

Efeitos dos Equipamentos de Proteção Individual em Defesa Biológica, Nuclear, Química e Radiológica sobre a Frequência Cardíaca e a Variabilidade da Frequência Cardíaca em Militares: uma revisão narrativa

Effects of Personal Protective Equipment in Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Defense on Heart Rate and Heart Rate Variability of the Human Body: a narrative review

RESUMO

Este estudo investiga os impactos dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI) utilizados na defesa biológica, nuclear, química e radiológica (DBNQR) sobre a frequência cardíaca (FC) e a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) do corpo humano. Tem o objetivo de traçar os percursos históricos acerca do que está descrito na literatura sobre o tema em questão, e abordar como a encapsulação dos EPIs pode impedir a dissipação de calor, elevando a FC e reduzindo a VFC e comprometendo a capacidade de resposta e a segurança dos trabalhadores. Neste descritivo, foram analisados estudos que demonstram que o uso prolongado desses equipamentos pode aumentar significativamente a carga térmica e fisiológica dos indivíduos expostos. Como conclusão, identificamos que o uso de EPIs em DBNQR impõe desafios significativos para a segurança e bem-estar dos trabalhadores, comprometendo sua capacidade fisiológica de regulação térmica. A elevação da FC e a redução da VFC podem impactar negativamente o desempenho e aumentar os riscos de colapso térmico e que medidas mitigadoras, como sistemas de resfriamento e treinamento adequado, são estratégias que podem ser relevantes para garantir a eficiência da missão da tripulação de voo.

Palavras-chave: Equipamentos de Proteção Individual. Defesa Química e Biológica. Frequência Cardíaca. Variabilidade da Frequência Cardíaca. Estresse Térmico

ABSTRACT

This study investigates the impacts of Personal Protective Equipment (PPE) used in biological, nuclear, chemical, and radiological defense (CBRN) on the heart rate (HR) and heart rate variability (HRV) of the human body. Studies analyzing the prolonged use of such equipment demonstrate a significant increase in thermal and physiological strain on exposed individuals. The literature review highlights that the encapsulation of PPE hinders heat dissipation, raising HR and reducing HRV, which may compromise workers' responsiveness and safety. Mitigation measures, such as cooling systems and adequate training, are discussed. In conclusion, we have identified that using PPE in DBNQR presents significant challenges to the safety and well-being of workers, compromising their physiological capacity for thermal regulation. Elevated heart rate (HR) and reduced heart rate variability (HRV) can negatively impact performance and increase the risk of heat-related collapse. Therefore, mitigating measures, such as cooling systems and adequate training, are relevant strategies to ensure the efficiency of the flight crew's mission.

Keywords: Personal Protective Equipment. Chemical and Biological Defense. Heart Rate. Heart Rate Variability. Thermal Stress.

Laura Cabral Cruz Lopes da Silveira Andrade

Universidade da Força Aérea - UNIFA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Email: laurabrasil@gmail.com

ORCID:

<https://orcid.org/0009-0008-7209-599X>

Paula Morisco de Sá

Universidade da Força Aérea - UNIFA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Email: paulamorisco@gmail.com

ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-7812-1895>

Vinicius de Oliveira Damasceno

Universidade da Força Aérea - UNIFA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Email: viniciusvod@fab.mil.br

ORCID:

<https://orcid.org/0000-0003-0577-9204>

Received:	02 Jun 2025
Reviewed:	Jun-Oct 2025
Received after revised:	02 Mar 2026
Accepted:	03 Mar 2026



RAN

Revista Agulhas Negras
eISSN (online) 2595-1084

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



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



1 Introdução

A segurança de militares expostos a ameaças biológicas, nucleares, químicas e radiológicas (BNQR) é provida pelo uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) (Brasil, 2014) e no caso das operações de Evacuação Aeromédica (EVAM), que consistem na remoção e transporte aéreo de pacientes em situações de risco, de um local sem assistência para outro em que tenham o devido tratamento (Brasil, 2020; Brasil, 2022c), faz-se necessário o uso de EPIs por todos os tripulantes de forma a protegê-los da contaminação em caso de ameaça BNQR (Brasil, 2014). Esses EPIs, projetados para encapsular o corpo, são compostos por camadas de proteção que impedem a penetração de substâncias perigosas (Brasil, 2014).

Nas EVAMs em que são acionadas aeronaves de asas rotativas, todos os tripulantes deverão utilizar os EPIs, e uma vez paramentados não podem fazer a retirada do equipamento com segurança até que a missão termine, pois nessas aeronaves não é possível criar uma zona de desinfecção (Brasil, 2016; Brasil, 2024). Portanto, o uso prolongado desses equipamentos, neste tipo de aeronave, apresenta alguns desafios significativos: a dificuldade na dissipação do calor corporal, impossibilidade de retirada do equipamento e da hidratação (Yokota; Karis; Tharion, 2014; Bogerd; Langenberg; DenHartog, 2018).

Esse cenário específico leva ao aumento da temperatura interna do corpo e à desidratação, elevando o risco de doenças relacionadas ao calor, como edema, câibras, exaustão e insolação (McArdle; Katch, I.; Katch, L.; 2016; Bein, 2024). O aumento da perda hídrica causa um aumento da frequência cardíaca (FC) e a diminuição da variabilidade da frequência cardíaca (VFC) (Jovanovic *et al.*, 2014; Maley *et al.*, 2020; Seo *et al.*, 2018; Yokota; Karis; Tharion, 2014), resultando em sobrecarga fisiológica do sistema cardiovascular, além de aumentar os sintomas como sede, cansaço, sensação de embriaguez e distúrbios visuais que podem comprometer o desempenho operacional (McArdle; Katch, I.; Katch, L., 2016).

Diante desse contexto, é importante compreender os efeitos do uso de EPIs de DBNQR sobre a dissipação de calor, a FC e a VFC, para a elaboração de estratégias que reduzam o estresse térmico e seus impactos fisiológicos. Este estudo tem como objetivo, ainda, analisar registros da literatura científica e militar que abordam as influências desses equipamentos sobre os parâmetros mencionados e suas possíveis consequências no desempenho operacional.

2 Referencial Teórico

2.1 A Força Aérea Brasileira e as ações em DBNQR



O Ministério da Aeronáutica, atual FAB, foi criado em 1941 por meio do Decreto-Lei 2.961, foi assinado pelo presidente da época, Getúlio Vargas (Diário Oficial da União, 1941). Em 1987, 46 anos depois, o Brasil vivenciou o primeiro evento de agente BNQR, um grave acidente radiológico com o Césio-137, ocorrido em Goiânia (GO). Esse acidente foi reportado quando um aparelho de radioterapia foi encontrado em uma clínica abandonada. O dispositivo foi desmontado e repassado, causando uma contaminação radioativa que afetou gravemente a saúde de centenas de pessoas. O acidente, classificado como nível 5 na Escala Internacional de Acidentes Nucleares, foi o maior incidente radioativo do Brasil e o maior do mundo fora de usinas nucleares (Brasil, 2014; Queiroga, 2022).

Na época, o Ministério da Aeronáutica foi acionado para transportar material e pessoas contaminadas para o Rio de Janeiro e outras localidades, mas a tripulação e a equipe destinada ao apoio não estavam adequadamente treinadas ou equipadas, resultando em efeitos de saúde graves que persistem até hoje. Naquela situação, a FAB também foi envolvida no transporte de vítimas fatais em urnas de cimento (Brasil, 2014).

Em 2010, a FAB organizou o 1º Workshop sobre Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN), destacando a necessidade de constante atualização tecnológica e logística. Em 2013, a FAB demonstrou prontidão novamente ao prestar apoio às vítimas do incêndio na boate Kiss, em Santa Maria (RS), realizando 91 missões com 12 aeronaves e estruturando a maior UTI aérea do país, no avião C-105 Amazonas (Brasil, 2014).

Em 2020, a FAB realizou ações de combate a pandemia de COVID-19:

Atuando, diariamente, no combate à pandemia, desde de 2020, a FAB já contabilizou cerca de 6 mil horas voadas na Operação COVID-19, deflagrada em 20 de março de 2020. Todas as atividades operacionais foram mantidas 24 horas por dia, como as operações aéreas, a defesa e controle do espaço aéreo e as atividades logísticas e de segurança. Em auxílio ao Sistema de Saúde nacional, a FAB também promoveu o transporte de mais de 5 mil toneladas de cargas, entre insumos e oxigênio, para a região Norte do País, de centenas de pacientes e de milhões de doses de vacinas contra a COVID-19 (Força Aérea Brasileira, 2022).

Atualmente a EVAM em DBNQR é amparada pelos seguintes documentos na FAB: DCA 1-6 (2014a), DCA 1-6 (2024) e Nota Técnica conjunta (2016). Observa-se, portanto, que a FAB realiza operações em DBNQR a “ação que consiste em empregar meios de Força Aérea para remover pessoas feridas ou doentes para locais onde possam receber assistência adequada” (Brasil, 2022c, p. 7), mesmo quando não estava estruturalmente preparada.

A DCA 1-6 (2014) aborda o macacão de tripulante usado como EPI em DBNQR para possibilitar o enfrentamento de maneira mais segura aos tripulantes e exemplifica os níveis de proteção A, B, C ou D:



Roupas de proteção nível A: proteção máxima, totalmente encapsuladas, utiliza sistema de respiração autônoma, destinado à proteção cutânea e das vias respiratórias contra gases, e microrganismos (eficaz para agentes QBRN). Roupas de proteção nível B: roupas encapsuladas ou não, destinadas à proteção cutânea e das vias respiratórias contra líquidos (eficaz para agentes QRN). Roupas de proteção nível C: roupas para proteção cutânea e das vias respiratórias contra partículas sólidas ou respingos de produtos líquidos (eficaz para agentes RN e alguns Q). As roupas de carvão ativado pertencem a esta categoria, assim como a roupa Tyvec. Roupas de proteção nível D: roupas para proteção parcial contra partículas sólidas ou respingos de produtos líquidos (Brasil, 2014, p.13).

Os equipamentos para proteção de tripulantes são classificados de acordo com o tipo e a operação de cada aeronave, no caso da opção do macacão de proteção BDNQR, ele deve ter segurança de no mínimo nível C (Brasil, 2014), que é o caso do macacão *Saratoga Blücher Technologies*, utilizado pela FAB como EPI em DBNQR. O macacão é fabricado a partir de um composto têxtil de duas camadas de tecido permeável ao ar (externa e interna). Na camada externa, é impregnado tratamento de repelência a óleo e água e a camada interna é a base de laminado filtrante, subdividida em mais três: a de cobertura, a mais próxima ao tecido externo, de esferas de carbono ativado (camada adsorvente) e a de tecido de malha tricotada, mais próxima à pele (Blücher, 2013).

É recomendado pela legislação brasileira que o uso das roupas “não deve comprometer a mobilidade dos tripulantes, principalmente dos pilotos, a ponto de prejudicar a segurança de voo” (Brasil, 2014, p.25). Contudo, adicionalmente ao macacão, os aeronavegantes devem utilizar máscara (compatível com o sistema de fonia), equipamentos de respiração, botas e luvas (Brasil, 2014). Há relatos na literatura de possíveis associações sobre o uso deste EPI com a degradação da performance e do desempenho em tripulantes (Thornton; Brown; Redman, 1985; NATO, 2004).

No caso do uso do EPI em DBNQR pela FAB, o 3º/8º GAv (Esquadrão Puma), operador do helicóptero Eurocopter EC725 (H-36 Caracal), possui no Programa de Elevação Operacional (INPREP/PEVOP/14C), o subprograma de qualificação específica (SPQE-8) para o voo com equipamento em DBNQR. A especialização inclui a qualificação de pilotos e tripulantes de voo em DBNQR, utilizando o EPI específico de aeronavegante, previsto na DCA 1-6 de 2014 (Brasil, 2022a).

As atividades realizadas pelos tripulantes a bordo de uma aeronave vão além das habilidades psicomotoras, abrangendo também habilidades técnicas de voo e não técnicas, do âmbito psicológico. No caso dessa unidade aérea (UAE), os pilotos além de pilotar a aeronave, gerenciam sistemas, planejam rotas, monitoram as condições meteorológicas, mantêm comunicação com o controle de tráfego aéreo e organizam a cabine.

Os tripulantes, como mecânicos e operadores de equipamento, auxiliam os pilotos em aspectos técnicos da aeronave, orientando sobre pousos e decolagens, devido à sua maior mobilidade, que lhes permite observar melhor os obstáculos ao colocar o corpo para fora do helicóptero, e também



gerenciam a movimentação na cabine de carga ou passageiros. Cada um desempenha suas respectivas funções de acordo com sua formação e a manutenção operacional (Brasil, 2022a).

No que se refere às habilidades específicas dos tripulantes para voos de EVAM em DBNQR, além do que foi tratado anteriormente, é necessário adaptar-se ao tipo de vestuário (Brasil, 2022a). Nesta UAE, o macacão de proteção BNQR é utilizado sobre o macacão de voo convencional (anti-chamas), conforme recomendações de uso pela OTAN, o que se relaciona ao fator de proteção, conforme evidenciado em estudos sobre combinações de uniformes e EPIs (Bogerd; Langenberg; DenHartog, 2018).

2.2 A Fisiologia humana do uso do EPI em DBNQR por meio dos estudos experimentais

A OTAN publicou, em 2004, um guia sobre a influência do EPI contra agentes BNQR na performance dos indivíduos. Para realizar essa mensuração, os tipos de EPI foram classificados em categorias de “baixa”, “média” e “alta” proteção. Sendo a primeira como a mais simples, uniforme convencional e máscara, e a última a mais complexa, com todos os equipamentos disponíveis, macacão de proteção, máscara, luvas e botas (NATO, 2004).

O uso da combinação de EPI com os diversos equipamentos de proteção foi estudado por Bogerd, Langenberg, DenHartog (2018). Nesse estudo foi constatada relação do fator de segurança associado ao uso de sobreposição de camadas de uniforme de proteção, de forma que quanto mais segura a roupa estava em relação a agentes BNQR, maior o risco associado à hipertermia (Bogerd; Langenberg; DenHartog, 2018). O fato do uso do EPI aumentar o isolamento da pele com o ambiente externo e possuir baixa permeabilidade para vapor d’água, dificulta a perda de calor por meio da evaporação (NATO, 2004; Yokota; Karis; Tharion, 2014).

O aumento de riscos associados a falta de compensação do organismo em relação a temperatura corporal, depende de fatores como o tipo de atividade, de roupa, de peso carregado, o nível de hidratação, o estado de aclimação do indivíduo, bem como o estado físico, a fadiga e as condições do clima (NATO, 2004). No caso do nível de hidratação, foi demonstrado que estar hidratado e/ou reidratar durante o esforço aumenta a adaptação, tolerância e permanência com o uso do EPI, entretanto, não é eficaz quando se chega num limite incompensável de estresse térmico (Cheung; Mclellan, 1998), pois a reposição eletrolítica possui influência marginal na taxa de armazenamento de calor e não é mais capaz de compensar a temperatura do corpo (Mclellan; Cheung, 2000).

O estudo de Latzka *et al.* (1998) investigou a eficácia da hiperidratação com glicerol e água antes do exercício, na tolerância ao calor e no esforço cardiovascular durante um estresse térmico induzido e não compensável pelo exercício. Os voluntários foram submetidos a um protocolo de



aclimação ao calor, caminhando a 45% do consumo máximo de oxigênio (VO_2 máximo) em uma esteira, realizando duas sessões de 50 minutos separadas por um intervalo de 10 minutos de descanso. Esse protocolo foi seguido por um período de 6 a 10 dias em um ambiente quente e seco, com temperatura ambiente de 35°C, umidade relativa de 45%, temperatura do ponto de orvalho de 25°C e velocidade do ar de 1 m/s (Latzka *et al.*, 1998).

Os resultados indicaram que a hiperidratação com glicerol proporcionou um aumento discreto na duração do exercício em comparação à hidratação convencional, porém sem diferença significativa em relação à hiperidratação com água. Além disso, nenhum dos métodos de hiperidratação influenciou significativamente a temperatura central, a taxa de sudorese, o débito cardíaco, a pressão arterial, a resistência periférica total ou a tolerância térmica. A exaustão ocorreu sob condições de estresse térmico, com temperaturas centrais e cutâneas semelhantes em todas as condições testadas.

No entanto, o benefício da hiperidratação reside no atraso dos efeitos adversos da hipohidratação (Latzka *et al.*, 1998). Complementando essa abordagem, Rubenstein *et al.* (2017) demonstraram que a hipohidratação já pode causar impactos perceptíveis com uma perda de apenas 2% do peso corporal em fluidos. No estudo de Latzka *et al.* (1998), apenas um participante atingiu esse nível de desidratação, correspondendo a uma redução de 2% de sua massa corporal.

Em busca de estratégias para mitigar os efeitos do estresse térmico, um estudo realizado na Sérvia avaliou o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI) no ambiente DBNQR, com e sem sistemas de resfriamento, durante um teste de 45 minutos. No grupo sem resfriamento (NO COOL), dois voluntários completaram o teste sem alterações significativas na percepção subjetiva de calor, enquanto sete interromperam devido a um esforço subjetivo intolerável, e um participante teve o teste encerrado ao atingir o limite máximo de temperatura corporal (temperatura do tímpano superior a 39,5°C) (Jovanovic *et al.*, 2014). Em contrapartida, no grupo que utilizou sistemas de resfriamento, 85% dos participantes completaram o teste, sem que a barreira térmica fosse atingida. A duração média do exercício foi estendida em 10 minutos em comparação à condição sem resfriamento (Jovanovic *et al.*, 2014).

Em relação ao ambiente, é fundamental considerar a variação térmica no local de trabalho, pois segundo Butler *et al.* (2023), a prática de exercícios e o esforço físico em condições quentes e úmidas afetam o desempenho humano e podem colocar o indivíduo em risco de estresse térmico. A alta umidade do ar influencia na taxa de produção de suor, por limitar o índice de evaporação e fazer com que a temperatura do corpo suba rapidamente (Baker, 2019; Klompmaker *et al.*, 2023).

Dessa forma, para que seja possível regular a temperatura corporal, é relevante compreender o processo responsável por realizar o equilíbrio dinâmico no interior do corpo, mantendo o ambiente interno relativamente constante, conhecido por homeostase (Power; Howley, 2014). Isso significa



que, apesar das variações no ambiente externo, o corpo é capaz de regular os seus processos internos para manter a temperatura e outros parâmetros dentro de limites favoráveis à vida (Power; Howley, 2014).

Em complemento à homeostase, a termorregulação representa a capacidade do corpo humano de regular a temperatura para condições ideais, que fica em torno de 36,6°C (Périard *et al.*, 2021), ou de maneira generalizada pelos estudos de 37°C. Segundo a literatura, valores abaixo de 35°C são considerados hipotermia (Powers; Howley, 2014) enquanto acima de 40,5°C são considerados hipertermia (Savioli *et al.*, 2022).

O principal centro de regulação do organismo é o cérebro humano, o qual por meio do hipotálamo, atua como um termostato interno que recebe sinais do corpo e ajusta as respostas fisiológicas para manter a temperatura corporal adequada. Quando essa temperatura ultrapassa o nível desejado, o organismo aciona mecanismos de regulação, como vasodilatação e sudorese para resfriar o corpo. Por outro lado, se a temperatura estiver abaixo do ideal, o corpo pode induzir calafrios para aumentar o metabolismo e gerar calor. Esses processos asseguram que o corpo mantenha o equilíbrio térmico, mesmo em condições ambientais adversas (McArdle; Katch, I.; Katch, L., 2016).

Dessa maneira, para que haja o equilíbrio corporal, é essencial que algum fator fisiológico (ex.: clima), patológico (ex.: febre) ou farmacológico (ex.: quimioterapia) perturbe o organismo, desencadeando respostas do hipotálamo para garantir a sobrevivência humana (MacDonald *et al.*, 2023). Em ambientes abaixo de 36°C, a perda de calor pode ser bastante efetiva por convecção, radiação e evaporação, porém em ambientes acima dessa temperatura, em que se excede a temperatura corporal, esses mecanismos se transformam em meios de ganhar energia, quando com EPI em DBNQR (NATO, 2004).

Além disso, os processos normais do organismo também auxiliam no desequilíbrio do corpo e aumento da temperatura interna, os quais são a taxa metabólica basal (TMB), a atividade muscular, os hormônios, os efeitos térmicos dos alimentos, as alterações posturais e o ambiente (McArdle; Katch, I.; Katch, L., 2016). Quando o organismo começa a gerar energia em quantidade suficiente para ultrapassar a faixa de equilíbrio térmico, sem a devida compensação, o estresse térmico se manifesta, provocado pelo aumento da produção de calor no corpo (McArdle; Katch, I.; Katch, L., 2016).

O aumento progressivo da temperatura do corpo pode gerar problemas fisiológicos, quando há falha na compensação cardiovascular, que incluem câibras, exaustão devido ao calor e intermação, sendo estas as principais manifestações em ordem crescente de gravidade (McArdle; Katch, I.; Katch, L., 2016; Bein, 2024). As respostas comuns também incluem vasodilatação, transpiração, taquicardia,



"estresse renal" devido à desidratação e disfunção de órgãos pela redução do fluxo sanguíneo (McArdle; Katch, I.; Katch, L.; 2016; Bein, 2024).

A literatura destaca os desafios térmicos e cardiovasculares na condição de uso do EPI de DBNQR, considerando que esses trajes limitam a dissipação de calor e aumentam a carga fisiológica dos usuários (Havenith; Den Hartog; Martini, 2011). Thornton; Brown; Redman (1985) foram um dos primeiros a investigar a carga térmica imposta por esses equipamentos em tripulações de voo, contribuindo para estudos subsequentes. Jovanovic *et al.* (2014) demonstraram que o uso de EPIs pode elevar a FC e reduzir a VFC, intensificando o estresse fisiológico.

Estudos mais recentes, como os de Seo *et al.* (2018) e Maley *et al.* (2020), apontam que estratégias como coletes de resfriamento e aclimação térmica podem mitigar esses efeitos, embora sua eficácia seja limitada pela impermeabilidade dos trajes. Yokota; Karis; Tharion (2014) analisaram a resposta autonômica ao estresse térmico e verificaram que a diminuição da VFC reflete uma maior ativação simpática e menor potencial de recuperação, aumentando o risco de colapso térmico (Power; Howley, 2014).

Nesse contexto, a dissertação de Soares (2024) sobre VFC em pilotos militares reforça o uso deste indicador como ferramenta para avaliar a carga de trabalho em ambientes operacionais de alta exigência. A autora evidencia que as alterações na modulação autonômica durante a atividade aérea refletem a demanda física e mental imposta aos pilotos, tornando a VFC um indicador sensível tanto da recuperação autonômica quanto do impacto de exposições prolongadas ao estresse operacional (Soares, 2024).

3 **Percorso Metodológico**

A presente revisão foi baseada em estudos experimentais que analisaram os efeitos fisiológicos do uso de EPI em DBNQR em diferentes condições ambientais (Jovanovic *et al.*, 2014; Maley *et al.*, 2020; Seo *et al.*, 2018; Yokota; Karis; Tharion, 2014). Foram considerados estudos que monitoraram a FC, VFC e temperatura corporal de indivíduos equipados com EPIs em ambientes de trabalho simulados e reais (Jovanovic *et al.*, 2014; Maley *et al.*, 2020; Seo *et al.*, 2018; Yokota; Karis; Tharion, 2014), um livro (Power; Howley, 2014) e uma dissertação (Soares, 2024).

As pesquisas dessas fontes, foram realizadas em bases científicas eletrônicas, como a *National Library of Medicine (Medline)* e a Biblioteca Virtual em Saúde do Ministério da Saúde. Na busca, utilizou-se como variável independente o EPI contra agentes BNQR, enquanto as variáveis dependentes incluíram fatores relacionados à fadiga mental e física. Os descritores foram



selecionados a partir das bases Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e *Medical Subject Headings* (MeSH).

Em relação à FAB, foram utilizados como documentos oficiais a DCA 1-1/ VOL II (Brasil, 2020), relativa a Doutrina Básica de uso da Força; a DCA 1-6 (2014) relativa a Doutrina em missão de DBNQR (Brasil, 2014), que apesar de ter sido revogada, ainda contém informações relevantes acerca dos trajes de proteção; a DCA 1-6 (2024), relativa aos aspectos gerenciais e concepções de uma missão em DBNQR (Brasil, 2024), cujo texto traz informações relevantes já abordadas na Norma Técnica Conjunta, utilizada para os Jogos Olímpicos e Paralímpicos de 2016 (Brasil, 2016). A NSCA 160-6, que trata da ação de EVAM e UTI-AÉREA (Brasil, 2022) e o documento da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), o ATP-65 (2004), que trabalha as questões dos uniformes de proteção e seu fator de desgaste humano em relação ao trabalho, tempo, umidade e composição da roupa (NATO, 2004) são documentos complementares a operação contra ameaças BNQR.

4 Resultados e Discussão

O uso de EPI em ambientes de DBNQR impõe desafios significativos à regulação térmica do organismo humano. Estudos demonstram que a utilização desses trajes cria um ambiente de estresse térmico insustentável, impactando diretamente a carga cardiovascular dos usuários (Havenith; DenHartog; Martini, 2011; Richmond *et al.*, 2013; Yokota; Karis; Tharion, 2014; Bogerd; Langenberg; DenHartog, 2018).

Em uma pesquisa realizada nas bases científicas foram encontrados 6 estudos sobre o uso de sistemas ou métodos de resfriamento corporal (pré e/ou durante atividades), que mencionam explicitamente métodos de resfriamento ativo, como coletes de gelo ou materiais de mudança de fase, imersão das mãos ou antebraços em água fria, ou ingestão de bebidas geladas (House; Holmes; Allsopp, 1997; House *et al.*, 2003; Khomenok *et al.*, 2008; Kenny *et al.*, 2011; Jovanovic *et al.*, 2014; Maley *et al.*, 2020); identificaram-se 3 estudos que abordam diretamente o impacto da hidratação na tolerância ao calor e na redução da tensão térmica (Cheung; Mclellan, 1998; Mclellan; Cheung, 2000; Rubenstein *et al.*, 2017); outros 3 estudos que exploram a influência da permeabilidade e ventilação das vestimentas (porosidade, permeabilidade ao vapor ou ajuste das camadas de roupa) e como influenciam o estresse térmico (Havenith; DenHartog; Martini, 2011; Godsmark *et al.*, 2018; Bogerd; Langenberg; DenHartog, 2018) e 10 estudos analisados que abordam o tema geral de vestimentas protetivas DBNQR como principal fator relacionado à elevação da tensão térmica (Mclellan; Aoyagi, 1996; Mclellan; Cheung, 2000; Brasser, 2010; Havenith; Den Hartog; Martini,



2011; Richmond *et al.*, 2013; Jovanovic *et al.*, 2014; Yokota; Karis; Tharion, 2014; Rubenstein *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2018; Maley *et al.*, 2020).

O estudo de Havenith, Den Hartog e Martini (2011) evidenciou que o isolamento térmico e a baixa permeabilidade ao vapor d'água dos EPIs limitam a dissipação de calor, aumentando a carga térmica e, consequentemente, a resposta cardiovascular. Esse impacto se reflete no aumento da frequência cardíaca (FC), que se eleva para compensar a menor eficiência da sudorese e a redução da dissipação de calor pela pele (Havenith; DenHartog; Martini, 2011).

A pesquisa de Bogerd, Langenberg, DenHartog (2018) reforça essa conclusão, demonstrando que a restrição da evaporação do suor e a resistência ao fluxo de ar no microclima criado pelo EPI contribuem para uma elevação progressiva da FC, mesmo em cargas de trabalho moderadas. Esse aumento é um reflexo da ativação do sistema nervoso simpático, o que leva a um maior esforço cardiovascular para manter a homeostase térmica (Power; Howley, 2014).

Em condições extremas de calor, a FC pode aumentar em até 50% em comparação com valores de repouso durante o uso prolongado desses EPIs, como demonstrado por Richmond *et al.* (2013). Em estudos conduzidos por Yokota, Karis e Tharion (2014), verificou-se que a variabilidade da frequência cardíaca (VFC), um importante indicador da resposta autonômica ao estresse térmico, sofreu uma significativa redução em indivíduos expostos a essas condições. A diminuição da VFC está associada a uma maior ativação simpática e menor modulação parassimpática, sugerindo uma sobrecarga cardiovascular e reduzida capacidade de recuperação (Yokota; Karis; Tharion, 2014).

Kenny *et al.* (2011) relataram que, em condições de alta temperatura, a FC pode atingir picos de até 170 bpm, enquanto a VFC reduz-se drasticamente, sugerindo um estado de estresse autonômico exacerbado. Esse efeito sugere uma diminuição da capacidade do organismo de se adaptar ao estresse térmico ao longo do tempo, aumentando o risco de eventos adversos, como exaustão térmica e colapso cardiovascular (Kenny *et al.*, 2011).

Algumas medidas de resfriamento têm sido sugeridas como estratégias eficazes para mitigar esses efeitos. Estudos de Maley *et al.* (2020) indicam que métodos de pré-resfriamento e resfriamento ativo durante o trabalho, como o uso de coletes térmicos e imersão de mãos em água fria, ajudam a reduzir a FC e a melhorar a tolerância ao calor. Esses métodos demonstraram prolongar o tempo de trabalho seguro em ambientes quentes e minimizar o impacto do estresse térmico sobre o sistema cardiovascular (Maley *et al.*, 2020).

O estudo de Khomenok *et al.* (2008) também reforça essa evidência, mostrando que a imersão das mãos em água fria durante os períodos de descanso reduz significativamente a FC e melhora a sensação de conforto térmico, prolongando a capacidade de trabalho em condições de calor extremo. Além disso, a pesquisa de Seo *et al.* (2018) indica que a aclimação ao calor ao longo de cinco dias



pode reduzir a carga cardiovascular, mas o uso de EPIs ainda representa um fator limitante para a adaptação completa, visto que o resultado encontrado não foi significativo estatisticamente.

Ainda assim, as características de operação na Força Aérea Brasileira (FAB) são restritas quanto aos meios que podem ser utilizados para amenizar os efeitos do uso do EPI, visto que em voo o uso de imersão das mãos em água, métodos de resfriamento, ou mesmo parar as operações de voo para criar um programa de aclimação para situações e treinamentos que não são frequentes no âmbito FAB, pode se tornar impraticável, tendo em vista o gerenciamento de erros e ameaças que afetam o voo seguro (Brasil, 2022b).

Dessa forma, as evidências científicas sugerem que o uso de EPIs em ambientes de DBNQR impõe um significativo estresse térmico e cardiovascular, reduzindo a eficiência da termorregulação e aumentando a carga de trabalho do coração (Havenith *et al.*, 2011; Richmond *et al.*, 2013; Yokota; Karis; Tharion, 2014; Bogerd; Langenberg; Denhartog, 2018). Estratégias como resfriamento ativo e aclimação térmica podem ajudar a atenuar esses efeitos, mas a eficácia dessas intervenções é variável e depende das condições ambientais e da duração da exposição ao calor (Khomenok *et al.*, 2008; Kenny *et al.*, 2011; Seo *et al.*, 2018; Maley *et al.*, 2020).

Além disso, a VFC tem sido utilizada como um indicador sensível da resposta autonômica ao estresse térmico, sendo capaz de refletir as adaptações do sistema nervoso autônomo em diferentes cenários operacionais (Soares, 2024). Estudos como o de Soares (2024) demonstram que a VFC pode ser empregada para caracterizar a carga de trabalho fisiológica de pilotos militares durante a atividade aérea, fornecendo *insights* relevantes sobre a recuperação autonômica e os impactos do estresse físico e mental prolongado.

Os principais achados foram sistematizados na tabela 1.

Tabela 1- Sistematização dos resultados a partir da revisão

Achado Principal	Impacto / Efeito Detalhado	Citação (Autor, Ano)
Isolamento Térmico e Baixa Permeabilidade dos EPIs	Limitou a dissipação de calor, elevando a carga térmica e aumentando a FC para compensar a sudorese ineficiente.	Havenith; DenHartog; Martini (2011)
Restrição da Evaporação do Suor e Fluxo de Ar	Contribuíram para uma elevação progressiva da FC, mesmo em cargas de trabalho moderadas, refletindo a ativação do sistema nervoso simpático e maior esforço cardiovascular.	Bogerd; Langenberg; DenHartog (2018)
Aumento Extremo da FC	A FC aumentou em até 50% em comparação com os valores de repouso durante o uso prolongado dos EPIs em condições extremas de calor.	Richmond <i>et al.</i> (2013)



Achado Principal	Impacto / Efeito Detalhado	Citação (Autor, Ano)
Redução da VFC	A VFC sofreu redução significativa, indicando maior ativação simpática e menor modulação parassimpática, o que sugere sobrecarga cardiovascular e capacidade de recuperação reduzida.	Yokota; Karis; Tharion (2014)
Picos de FC e Redução Drástica da VFC	A FC atingiu picos de 170 bpm, enquanto a VFC reduziu drasticamente, sugerindo um estado de estresse autonômico exacerbado e maior risco de exaustão térmica/colapso cardiovascular.	Kenny <i>et al.</i> (2011)
Eficácia de Métodos de Resfriamento Ativo	O pré-resfriamento e o resfriamento ativo (coletes térmicos, imersão de mãos em água fria) durante o trabalho ajudaram a reduzir a FC e a melhoraram a tolerância ao calor, prolongando o tempo de trabalho seguro.	Maley <i>et al.</i> (2020)
Imersão das Mãos em Água Fria	Durante os períodos de descanso, reduziu significativamente a FC e melhorou a sensação de conforto térmico, prolongando a capacidade de trabalho em calor extremo.	Khomenok <i>et al.</i> (2008)
Efeito da Aclimação ao Calor	A aclimação ao calor reduziu a carga cardiovascular, mas o uso de EPIs permaneceu um fator limitante para a adaptação completa (resultado encontrado não foi significativo).	Seo <i>et al.</i> (2018)
VFC como Indicador de Carga Fisiológica	A VFC pode ser usada para caracterizar a carga de trabalho fisiológica de pilotos militares durante a atividade aérea, fornecendo insights sobre a recuperação autonômica.	Soares (2024)

Legenda: EPIs, equipamentos de proteção individual; FC, Frequência Cardíaca; VFC, variabilidade da frequência cardíaca.

Fonte: Os autores

5 Considerações Finais

O uso de EPIs em DBNQR impõe desafios significativos para a segurança e bem-estar dos militares, comprometendo sua capacidade fisiológica de regulação térmica. A elevação da FC e a redução da VFC podem impactar negativamente o desempenho e aumentar os riscos de colapso térmico (Power; Howley, 2014). Para mitigar os efeitos adversos decorrentes do uso do EPI em DBNQR, é imprescindível adotar medidas como o aprimoramento no design desses equipamentos e treinamentos específicos. É possível que os resultados deste estudo podem contribuir para o estabelecimento de novos protocolos operacionais, assim como sugestões de design de EPIs e treinamento preventivo para mitigação dos efeitos térmicos. Ressalta-se a importância da



implementação de estratégias como o resfriamento ativo e a otimização dos protocolos operacionais, com o objetivo de reduzir a sobrecarga térmica e cardiovascular em ambientes extremos.



Referências

- BEIN, T. Pathophysiologie und Management der Hitzeerkrankung. **Medizinische Klinik, Intensivmedizin und Notfallmedizin**, v. 119, n. 5, p. 373–380, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00063-023-01072-1>, Acesso em: 23 maio 2025.
- BLÜCHER GmbH. **Instruction manual**: CBRN protective coverall POLYPROTECT 12. Erkrath: Blücher GmbH, 2013. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/2063568/Blucher-Saratoga-Cbrn-Protective-Coverall.html?page=3>. Acesso em: 21 maio 2025.
- BOGERD, C. P.; LANGENBERG, J. P.; DENHARTOG, E. A. A novel adjustable concept for permeable gas/vapor protective clothing: Balancing protection and thermal strain. **Annals of Work Exposures and Health**, v. 62, n. 2, p. 232–242, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx101>. Acesso em: 10 maio 2025.
- BAKER, L. B. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. **Temperature**, v. 6, n. 3, p. 211–259, 2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6773238/>. Acesso em: 10 maio 2025.
- BRASSER, P. Optimizing the protection against the physiological burden of CBRN clothing. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, v. 16, n. 2, p. 153–168, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10803548.2010.11076836>. Acesso em: 10 maio 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **DCA 1-1/Vol II**: Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira - Volume 2. Brasília, 2020.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **DCA 1-6**: Doutrina De Preparo E Emprego Da Fab Em Missões De Transporte Na Defesa Química, Biológica, Radiológica E Nuclear (DQBRN). Brasília, 2014.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **DCA 1-6**: Doutrina De Defesa Biológica Nuclear Química e Radiológica (DBNQR). Brasília, 2024.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Instrução do Comando de Preparo sobre o Programa de Elevação Operacional nº 14C (INPREP/PEVOP/14C) - **Programa de Elevação Operacional - PEVOP H-36**. Brasília, 2022a.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **MCA 3-10**: Manual do Facilitador de CRM (Corporate Resource Management) da Força Aérea Brasileira. Brasília, 2022b.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **NSCA 160-6**: Evacuação Aeromédica (EVAM) e UTI-Aérea da Aeronáutica. Brasília, 2022c.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Ministério da Defesa. Nota Técnica conjunta. **Estrutura de atendimento às ameaças, incidentes ou ataques de natureza química, biológica, radiológica e nuclear no período dos jogos Rio 2016**. Brasília, 2016.
- BUTLER, C. *et al.* Current clinical concepts: Heat tolerance testing. **Journal of athletic training**, v. 58, n. 2, p. 84–90, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10072087/>. Acesso em: 10 maio 2025.
- CHEUNG, S. S.; MCLELLAN, T. M. Influence of hydration status and fluid replacement on heat tolerance while wearing NBC protective clothing. **European journal of applied physiology and occupational physiology**, v. 77, n. 1–2, p. 139–148, 1998. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004210050312>. Acesso em: 19 maio 2025.
- FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **A FAB e o combate à pandemia de COVID-19 em 2021**. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/38481/OPERA%C3%87%C3%83O%20COVID-19%20->



[%20A%20FAB%20e%20o%20combate%20%C3%A0%20pandemia%20de%20COVID-19%20em%202021](#). Acesso em: 20 maio 2025.

GODSMARK, C. N. *et al.* Moisture vapour permeable gloves extend thermal endurance and safe work time more than other similarly permeable chemical-biological ancillary protective items. **Ergonomics**, v. 61, n. 12, p. 1635–1645, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1503726>. Acesso em: 19 maio 2025.

HAVENITH, G.; DEN HARTOG, E.; MARTINI, S. Heat stress in chemical protective clothing: porosity and vapour resistance. **Ergonomics**, v. 54, n. 5, p. 497–507, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00140139.2011.558638>. Acesso em: 19 maio 2025.

HOUSE, J. R. *et al.* Testing the effectiveness of techniques for reducing heat strain in Royal Navy nuclear, biological and chemical cleansing stations' teams. **Journal of the Royal Naval Medical Service**, v. 89, n. 1, p. 27–34, 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14655424/>. Acesso em: 19 maio 2025.

HOUSE, J. R.; HOLMES, C.; ALLSOPP, A. J. Prevention of heat strain by immersing the hands and forearms in water. **Journal of the Royal Naval Medical Service**, v. 83, n. 1, p. 26–30, 1997. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9282438/>. Acesso em: 19 maio 2025.

JOVANOVIĆ, D. *et al.* Physiological tolerance to uncompensated heat stress in soldiers: Effects of various types of body cooling systems. *Vojnosanitetski pregled*. **Military-medical and pharmaceutical review**, v. 71, n. 3, p. 259–264, 2014. Disponível em: <https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0042-84501300045J>. Acesso em: 19 maio 2025.

KENNY, G. P. *et al.* Ice cooling vest on tolerance for exercise under uncompensable heat stress. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 8, n. 8, p. 484–491, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.596043>. Acesso em: 23 maio 2025.

KHOMENOK, G. A. *et al.* Hand immersion in cold water alleviating physiological strain and increasing tolerance to uncompensable heat stress. **European journal of applied physiology**, v. 104, n. 2, p. 303–309, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00421-008-0693-y>. Acesso em: 7 jun. 2025.

KLOMPMAKER, J. O. *et al.* Long-term exposure to summer specific humidity and cardiovascular disease hospitalizations in the US Medicare population. **Environment international**, v. 179, n. 108182, p. 108182, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412023004555?via%3Dihub>. Acesso em: 7 jun. 2025.

LATZKA, W. A. *et al.* Hyperhydration: tolerance and cardiovascular effects during uncompensable exercise-heat stress. **Journal of applied physiology** (Bethesda, Md.: 1985), v. 84, n. 6, p. 1858–1864, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1152/jap.1998.84.6.1858>. Acesso em: 7 jun. 2025.

MACDONALD, R. C. *et al.* Consideration of the importance of measuring thermal discomfort in biomedical research. **Trends in molecular medicine**, v. 29, n. 8, p. 589–598, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10619709/>. Acesso em: 12 junho 2025.

MALEY, M. J. *et al.* Extending work tolerance time in the heat in protective ensembles with pre- and per-cooling methods. **Applied Ergonomics**, v. 85, p. 103064, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687018306379?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MCARDLE, W.; KATCH, I.; KATCH, L. **Fisiologia do Exercício: Nutrição, Energia e Desenvolvimento Humano**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016.



MCLELLAN, T. M.; AOYAGI, Y. Heat strain in protective clothing following hot-wet or hot-dry heat acclimation. **Canadian journal of applied physiology**, v. 21, n. 2, p. 90–108, 1996. Disponível em: <https://cdnscepub.com/doi/10.1139/h96-009>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MCLELLAN, T. M.; CHEUNG, S. S. Impact of fluid replacement on heat storage while wearing protective clothing. **Ergonomics**, v. 43, n. 12, p. 2020–2030, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00140130050201454>. Acesso em: 19 jun. 2025.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION (NATO). ATP-65 - The effect of wearing NBC individual protection equipment on individual and unit performance during military operations. **NATO Standardization Agency (NSA)**, 2004.

PÉRIARD, J. D.; *et al.* Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies. **Physiological reviews**, v. 101, n. 4, p. 1873–1979, 2021. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/physrev.00038.2020>. Acesso em: 12 jun. 2025.

POWERS, S.; HOWLEY, E. **Fisiologia do Exercício: teoria e aplicação ao condicionamento e ao desempenho**. 8. ed. Barueri: Manole, 2014.

QUEIROGA, M. M. V. O Sistema de Defesa Biológica, Nuclear, Química E Radiológica E A Contribuição Para A Pronta Resposta Da Força Aérea Brasileira. **Escola Superior de Guerra**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://repositorio.esg.br/bitstream/123456789/1618/1/CAEPE.59%20TCC%20VC.pdf>. Acesso em 26 fev. 2026.

RICHMOND, V. L. *et al.* Insulated skin temperature as a measure of core body temperature for individuals wearing CBRN protective clothing. **Physiological measurement**, v. 34, n. 11, p. 1531–1543, 2013. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0967-3334/34/11/1531>. Acesso em: 29 jun. 2025.

RUBENSTEIN, C. D. *et al.* Fluid replacement advice during work in fully encapsulated impermeable chemical protective suits. **Journal of occupational and environmental hygiene**, v. 14, n. 6, p. 448–455, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1296230>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SAVIOLI, G. *et al.* Heat-related illness in emergency and critical care: Recommendations for recognition and management with medico-legal considerations. **Biomedicines**, v. 10, n. 10, p. 2542, 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9599879/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SEO, Y. *et al.* Effects of 5-Day Heat Acclimation on Workers Wearing Personal Protective Clothing. **Journal of Exercise and Nutrition**, v.1, n.1, 2018. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10194072/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SOARES, A. B. F. **Variabilidade da Frequência Cardíaca em Pilotos Militares Durante a Atividade Aérea: Uma Revisão de Escopo**. 2024, 98 p. Dissertação (Mestrado em Desempenho Humano Operacional) - Universidade da Força Aérea, Brasil, 2024.

THORNTON, R.; BROWN, G. A.; REDMAN, P. J. The effect of the UK aircrew chemical defence assembly on thermal strain. **Aviation, space, and environmental medicine**, v. 56, n. 3, p. 208–211, 1985. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3985899/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

YOKOTA, M.; KARIS, A. J.; THARION, W. J. Thermal-work strain in law enforcement personnel during chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) training. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, v. 20, n. 2, p. 126–133, 2014. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4060587/>. Acesso em: 29 jun. 2025.