



UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESEMPENHO HUMANO
OPERACIONAL

AMANDA BRANDELLO FARIAS SOARES, Cap QOAv

Rio de Janeiro

2024

UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESEMPENHO HUMANO
OPERACIONAL

AMANDA BRANDELLO FARIAS SOARES, Cap QOAv

Variabilidade da Frequência Cardíaca em Pilotos Militares Durante a Atividade Aérea:

Uma Revisão de Escopo

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desempenho Humano Operacional da Universidade da Força Aérea como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desempenho Humano Operacional
Orientador: Prof. Dr. Fábio Angioluci Diniz Campos

Rio de Janeiro

2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFA

Soares, Amanda Brandello Farias

S676v

Variabilidade da frequência cardíaca em pilotos militares durante a atividade aérea: uma revisão de escopo / Amanda Brandello Farias Soares. – Rio de Janeiro: Universidade da Força Aérea, 2024.

58 f.: il., enc.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Angioluci Diniz Campos
Dissertação (mestrado) – Universidade da Força Aérea, Rio de Janeiro, 2024.

Referências: f. 52-57

1. Aviador. 2. Carga de trabalho. 3. Sistema nervoso autônomo. 4. Resposta psicofisiológica I. Título. II. Campos, Fábio Angioluci Diniz. III. Universidade da Força Aérea.

CDU: 616.12-008.3

AMANDA BRANDELLO FARIAS SOARES, Cap QOAv

Variabilidade da Frequência Cardíaca em Pilotos Militares Durante a Atividade Aérea:

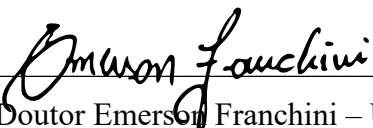
Uma Revisão de Escopo

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desempenho Humano Operacional da Universidade da Força Aérea como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desempenho Humano Operacional

Aprovado por:

Professor Doutor Fábio Angioluci Diniz Campos – UNIFA

Professora Doutora Fabrícia Geralda Ferreira – UNIFA



Professor Doutor Emerson Franchini – USP

Rio de Janeiro

Março de 2024

*A Deus, por me conceder saúde para lutar
pelos meus sonhos.*

*Ao meu marido, Gabriel Brandello, por ser
exemplo, fonte de inspiração e meu porto
seguro.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por caminhar ao meu lado todos os dias da minha vida, me fortalecendo e permitindo a conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Campos, que concordou em embarcar comigo nessa jornada e permaneceu fiel e paciente durante todo o caminho. Obrigada pelos ensinamentos, conversas, conselhos e, principalmente, amizade. Esse trabalho é fruto da sua competência profissional, dedicação na arte de ensinar, comprometimento com os alunos e empatia. Minha gratidão é eterna.

Aos professores do PPGDHO, agradeço imensamente por todos os ensinamentos. Os senhores tornaram o aprendizado mais fácil e agradável e são exemplos de dedicação e profissionalismo.

À Prof.^a Dr.^a Fabrícia, ao Prof. Dr. Emerson e ao Major Almeida, que tanto contribuíram para o desenvolvimento e aprimoramento dessa pesquisa. Todas as orientações, críticas e sugestões foram fundamentais. Obrigada pela paciência e respeito sempre demonstrados.

Aos meus pais e irmã por me ensinarem desde cedo a importância de adquirir novos conhecimentos. Obrigada por compreenderem minha ausência e pelo incentivo a permanecer firme nos estudos.

Ao meu marido e grande exemplo profissional, Major Brandello, obrigada pelo incentivo a ingressar no Mestrado, por me manter firme no percurso, pela compreensão nos dias difíceis e por caminhar comigo todos os dias. Seu apoio foi imprescindível.

Aqueles que se apaixonam apenas pela prática, sem se importar com a exatidão ou a ciência, são como o piloto que embarca sem um leme ou uma bússola, e nunca sabe onde irá chegar. (Leonardo Da Vinci)

RESUMO

A pilotagem de uma aeronave é uma atividade multitarefa complexa, a qual envolve o gerenciamento de informações de forma não automática e gera elevada carga de trabalho (psicológica, cognitiva e física) ao piloto. O excesso dessas demandas pode resultar em diminuição de performance e prejudicar a segurança de voo. Estudos recentes têm utilizado a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) como método para acessar a carga de trabalho do operador em ambientes complexos, sendo essa medida capaz de identificar o estresse e a recuperação do sistema nervoso autônomo (SNA). Entretanto, um melhor entendimento da influência da atividade aérea na modulação autonômica do piloto é necessário. Nesse sentido, o presente estudo realizou uma revisão de escopo com o objetivo de identificar as alterações na modulação autonômica de pilotos militares durante a atividade aérea, visando caracterizar a carga de trabalho do piloto militar em diferentes momentos e perfis de voo. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados MEDLINE (via PubMed), SCOPUS e LILACS. Registros recentes (2002-2022) que analisaram a VFC em pilotos militares durante a atividade aérea foram incluídos. Estudos nos quais a atividade de pilotagem não era realizada foram excluídos. O estudo foi realizado de acordo com as orientações do PRISMA-Scr. Foram obtidos 298 registros, dos quais 19 foram incluídos na revisão. Os estudos analisaram voos realizados em aviões de alta e baixa performance, helicópteros e simuladores de voo, utilizando índices do domínio do tempo, da frequência e métodos não lineares da VFC. Os voos reais e simulados produziram alterações autonômicas significativas. As alterações do SNA persistiram por até 5 horas após o pouso. Durante o voo real, os índices mais sensíveis para identificar variações na carga de trabalho do piloto foram RMSD, SDNN, LF/HF e SD1, enquanto o intervalo RR, SDNN, SD1 e SD2 foram os índices mais sensíveis ao comparar segmentos de voo simulado com diferentes níveis de dificuldade. A atividade aérea produziu aumento da atividade simpática, sendo os diferentes domínios da VFC afetados pelo voo. A VFC foi capaz de indicar a carga de trabalho do piloto nas diferentes fases do voo, demonstrando-se sensível às diferentes exigências. O tempo de recuperação do sistema nervoso autônomo deve ser analisado para cada perfil de voo, a fim de programar o descanso adequado entre voos consecutivos.

Palavras-chave: aviador; carga de trabalho; sistema nervoso autônomo; resposta psicofisiológica; modulação autonômica.

ABSTRACT

Piloting an aircraft is a complex multitasking activity, which involves managing information in a non-automatic way and generates a high workload (psychological, cognitive and physical) for the pilot. The excess of these demands can result in decreased performance and may impair flight safety. Heart rate variability (HRV) has been used in recent studies as a method to investigate operator's workload in complex environments. This measure can assess the stress and recovery ability of the autonomic nervous system (ANS). However, a better understanding of flight influence on the pilot's autonomic modulation is necessary. Therefore, this scoping review aims to identify changes in the autonomic modulation of military pilots during flight, to characterize their workload at different moments and flight profiles. A literature search was conducted using MEDLINE (by PubMed), SCOPUS and LILACS databases. Recent records (2002-2022) that analyzed HRV in military pilots during flight were included. Meanwhile, studies in which piloting activity was not performed were excluded. The study was conducted in accordance with Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses guideline extension for Scoping Reviews (PRISMA-Scr) and the Updated Methodological Guidance for the Conduct of Scoping Reviews. A total of 298 records were obtained, of which 19 were included in the systematic review. The studies analyzed flights performed in high and low-performance aircraft, helicopters, and flight simulators, using time-domain, frequency-domain and non-linear HRV indices. Real and simulated flights produced significant autonomic changes. Some flights elicited ANS responses that persisted up to 5h after landing. During real flight, the most sensitive indices for identifying variations in pilot workload were RMSD, SDNN, LF/HF and SD1, whereas the interval RR, SDNN, SD1 and SD2 were the most sensitive indices when comparing segments of simulated flight with different levels of difficulty. Flying produced increased sympathetic activity, with the different domains of HRV being affected by the flight. HRV was able to assess pilot's workload in the different phases of flight, proving to be sensitive to accessing different demands. The recovery time of the autonomic nervous system should be analyzed for each flight profile in order to plan adequate rest between consecutive flights.

Keywords: *aviator; workload; autonomic nervous system; psychophysiological response; autonomic modulation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das unidades operacionais da Força Aérea Brasileira	19
Figura 2 - Relação hipotética entre carga de trabalho e performance	24
Figura 3 - Fluxograma de busca	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais índices da variabilidade da frequência cardíaca.....	29
Quadro 2 - Alterações autonômicas no voo real	34
Quadro 3 - Alterações autonômicas no voo simulado.....	38
Quadro 4 - Alterações autonômicas no voo real versus simulado	44
Quadro 5 - Efeito da atividade aérea na modulação autonômica.....	45
Quadro 6 – Estratégia de busca	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFA - Academia da Força Aérea

CFOAV - Curso de Formação de Oficiais Aviadores

ECCG - Valor do eletrocardiograma

FAB - Força Aérea Brasileira

FC - Frequência cardíaca

GAV - Grupo de Aviação

HF - Componente de alta frequência

HR - Frequência cardíaca (do inglês: *heart rate*)

HRVti - Índice triangular

IBI - Intervalo entre batimentos cardíacos consecutivos (do inglês: *interbeat interval*)

ICAO - Organização da Aviação Civil Internacional (Do inglês: *International Civil Aviation Organization*)

ILS - Sistema de pouso por instrumento (do inglês: *instrument landing system*)

IVR - Inteligência, Vigilância e Reconhecimento

LF - Componente de baixa frequência

LF/HF - Razão entre LF e HF

NASA-TLX - Índice de carga de tarefa da NASA (do inglês: *NASA Task Load Index*)

NN - Tempo entre intervalos RR normais

NN50 - Número de intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms

pNN20 - Número de intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 20ms dividido pelo número total de intervalos RR

pNN50 - Porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms

RMSSD - Raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes em um intervalo de tempo

RR ou RRi - Intervalo entre batimentos cardíacos consecutivos

S/SP - Razão simpática parassimpática

SampEn - Entropia da amostra

SD1 - Dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré

SD2 - Dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré

SDNN - Desvio padrão de todos os intervalos RR normais gravados em um intervalo de tempo

SDSD - Desvio padrão da diferença entre intervalos NN adjacentes

SI - Índice de estresse

SNA - Sistema Nervoso Autônomo

SS - Pontuação de estresse

TOTpow - Potência total

ULF - Componente de ultrabaixa frequência

VFC - Variabilidade da Frequência Cardíaca

VLF - Componente de muito baixa frequência

VOR - Radiofarol onidirecional em VHF (do inglês: *very high frequency omnidirectional range*)

α_1 - Expoente de escalonamento fractal de curto prazo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	A Força Aérea Brasileira	18
3.1.1	Avanços tecnológicos e modernização da Força Aérea Brasileira	19
3.1.2	A formação e especialização do piloto da Força Aérea Brasileira	20
3.2	Carga de trabalho	22
3.2.1	Carga de trabalho do piloto.....	24
3.2.2	Métodos para avaliar carga de trabalho	27
3.3	Variabilidade da Frequência Cardíaca	28
4	METODOLOGIA	31
4.1	Estratégia de busca	31
4.1.1	CrITÉrios de elegibilidade	31
4.2	Extração de dados	32
5	RESULTADOS	33
5.1	Voo real	33
5.2	Voo simulado	38
5.3	Voo real <i>versus</i> voo simulado	44
5.4	Índices da variabilidade da frequência cardíaca	45
6	DISCUSSÃO	47
6.1	Limitações	50
7	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – Estratégia de busca	58

1 INTRODUÇÃO

A atividade militar é caracterizada por elevado nível de estresse, seja em treinamentos ou operações reais. No cenário tático, os estressores vivenciados ocorrem de várias formas, tais como treinamento físico exaustivo, vigilância, possibilidade de risco de vida, tensão cognitiva, emoções, baixas margens de erros, entre outros (Stephenson *et al.*, 2021). Em situações reais, tais fatores são imprevisíveis e incontroláveis, porém é possível estabelecer treinamentos para minimizar sua influência no sucesso das missões.

Dentre a gama de profissões militares estressantes destaca-se a atividade aérea. O piloto de uma aeronave capta informações internas e externas à cabine, filtra e processa essas informações para tomadas de decisão eficientes, ao mesmo tempo que mantém os comandos da aeronave, executando ações rápidas e precisas. Esse processo exige elevada atividade cognitiva, principalmente em momentos críticos do voo, como decolagens, aproximações e pousos (Roscoe, 1992).

Soma-se aos recursos cognitivos despendidos, o risco inerente da atividade aérea e a responsabilidade que recai sobre o piloto de gerenciar todos os meios disponíveis para o cumprimento eficaz e seguro da missão. Assim, a necessidade de atenção constante e responsabilidade da função contribuem para o surgimento do estresse mental (Ribas; Ribeiro, 2003).

O ambiente aéreo também faz surgir diversas reações indesejadas, as quais interferem na homeostase do indivíduo, tais como desidratação, fadiga, ilusão de ótica, desorientação espacial e estresse por vibração e ruído (Reinhart, 2007). Esse conjunto de fatores gera uma série de reações fisiológicas no piloto, as quais devem ser compreendidas a fim de criar mecanismos para minimizar os efeitos indesejados.

Quanto maior a complexidade e duração do voo, mais recursos cognitivos são necessários e maior o estresse (mental e físico) gerado. O excesso dessas demandas sobre o piloto pode levá-lo a vivenciar o processo de fadiga. A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) (2016) define fadiga como um estado fisiológico de reduzida performance física ou mental, decorrente de perda de sono, de períodos estendidos de vigília, de ciclos circadianos ou de carga de trabalho, que podem prejudicar o estado de alerta e a capacidade do indivíduo para desempenhar funções operacionais relacionadas com a segurança. Na aviação, a principal forma de fadiga é a mental, no entanto, a fadiga física também pode acometer as tripulações (Wingelaar-Jagt *et al.*, 2021).

No intuito de mitigar os efeitos da fadiga, a ICAO estabelece quatro princípios básicos que devem ser considerados: necessidade de dormir; perda e recuperação de sono; efeitos

circadianos no sono e desempenho; e a influência da carga de trabalho. No contexto militar, especialmente em cenários táticos, o risco e a demanda da atividade aérea sobre o piloto são mais intensos devido à operação em ambientes complexos e adversos. Por necessidades táticas, os limites operacionais podem ser estendidos e o sono, fator fundamental para descontinuar o processo da fadiga, pode ser irregular ou de qualidade inferior (Wingelaar-Jagt *et al.*, 2021). Nesse sentido, o monitoramento da carga de trabalho vivenciada pelo piloto durante a atividade aérea pode servir como agente mitigante desse processo, identificando momentos de maior demanda física e cognitiva.

Contudo, esse monitoramento no ambiente operacional apresenta um grande desafio, dada a limitação de espaço dentro de uma aeronave e a imperativa necessidade de evitar interferências no curso do voo (Fernández-Morales *et al.*, 2022). Nesse sentido, estudos na área da aviação buscam métodos não-invasivos, capazes de refletir a demanda do voo em tempo real. De forma geral, os métodos de análise da carga de trabalho são divididos em avaliações subjetivas (questionários) e objetivas (fisiológicas). Enquanto as avaliações subjetivas dependem da percepção do indivíduo e de seu esforço para realização da tarefa, medidas fisiológicas são mais objetivas e fornecem informações contínuas sobre a demanda do voo (Veltman; Gaillard, 1996b).

Nas últimas décadas, houve aumento no número de pesquisas que utilizaram a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) para investigar a carga de trabalho do piloto (Mansikka *et al.*, 2016b; Sauvet *et al.*, 2009; Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez, 2021). Sua utilização permite inferir a atividade do sistema nervoso autônomo (SNA), o qual possui papel importante na manutenção da homeostase do indivíduo. Na aplicação clínica, alta VFC aponta para indivíduos saudáveis, com boa adaptação do organismo. Por outro lado, mudanças nos padrões de VFC fornecem um indicador antecipado de comprometimento da saúde, sendo baixa VFC característica de adaptação anormal do SNA (Vanderlei *et al.*, 2009).

Em cenários táticos, a VFC é útil para avaliar as respostas a estímulos agudos. Quando apresentado um estímulo específico, a resposta de VFC de um indivíduo pode variar de acordo com seus conhecimentos, habilidades e capacidade de desempenho. Nesse contexto, operadores com alta VFC demonstram maior precisão e rapidez durante a execução de tarefas cognitivas, lidando melhor com o fator estressor (Stephenson *et al.*, 2021). Dessa maneira, a análise da VFC reflete a prevalência da atividade simpática ou parassimpática, sendo um método não-invasivo para acessar o estresse e a recuperação do SNA (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a).

Apesar da recente utilização do método para estimar carga de trabalho na aviação (Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019; Villafaina *et al.*, 2021) e em outros ambientes estressantes (Clemente-Suárez; Robles-Pérez; Fernández-Lucas, 2017; Delgado-Moreno *et al.*, 2019), ainda não está claro de que forma os diferentes índices da VFC são influenciados pela atividade aérea. Essa compreensão mais aprofundada permitiria identificar o estado do operador em tempo real, podendo propiciar melhor treinamento e períodos de recuperação adequados, evitando a sobrecarga e consequente queda de desempenho durante a atividade operacional. Ao compreender de forma mais precisa as exigências da pilotagem militar, por intermédio das avaliações objetivas, acredita-se que será possível desenvolver estratégias para otimizar o treinamento, minimizar estresse e fadiga e, conseqüentemente, aumentar a segurança e o desempenho humano no cumprimento das missões operacionais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar, por meio de uma revisão de escopo, as alterações na modulação autonômica de pilotos militares, durante a atividade aérea, visando caracterizar a carga de trabalho do piloto militar em diferentes momentos e perfis de voo.

2.2 Objetivos específicos

Identificar as alterações da frequência cardíaca (FC) e da VFC do piloto militar antes, durante e após a realização de um voo;

Determinar quais parâmetros da VFC são mais influenciados pela atividade aérea;

Verificar se a VFC é capaz de identificar as fases de maior carga de trabalho para o piloto militar durante diferentes perfis de voo;

Verificar o tempo de recuperação do SNA após a atividade aérea.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A Força Aérea Brasileira

“As Forças Armadas, constituídas pela Marinha, Exército e Aeronáutica, são instituições nacionais permanentes e regulares, destinando-se à defesa da Pátria, à garantia dos poderes constitucionais e, por iniciativa de qualquer destes, da lei e da ordem.” (BRASIL, 1988). Além de sua destinação constitucional, as Forças Armadas possuem atribuições subsidiárias, relacionadas ao desenvolvimento nacional e defesa civil, atuando nos campos social, econômico e da ciência, tecnologia e inovação (BRASIL, 1999).

Especificamente, a Aeronáutica tem a missão de defender o Brasil, impedindo o uso do espaço aéreo brasileiro e do espaço exterior para atividades hostis ou contrárias aos interesses nacionais. Além disso, desempenha um papel fundamental na integração do território nacional, possuindo a missão-síntese de: “Manter a soberania do espaço aéreo e integrar o território nacional, com vistas à Defesa da Pátria” (BRASIL, 2018).

Nesse sentido, a Força Aérea Brasileira (FAB) presta serviços de tráfego aéreo e cumpre missões de busca e salvamento em uma área de 22 milhões de quilômetros quadrados, correspondentes à extensão do território nacional, mar territorial e águas internacionais. Além disso, emprega seus vetores em pontos estratégicos do país, garantindo a soberania do espaço aéreo em todo seu território e fronteiras, totalizando uma área de 12 milhões de quilômetros quadrados. Ainda, realiza missões de ajuda humanitária, transporte de pessoal, órgãos e urnas eleitorais, evacuações aeromédicas e ações cívico-sociais, garantindo a presença do Estado em locais de difícil acesso (BRASIL, 2018).

A fim de assegurar o cumprimento integral de sua missão, a FAB dispõe de unidades operacionais, compostas por unidades aéreas e de apoio terrestre, estrategicamente distribuídas por todo o território nacional. Essas unidades desempenham uma gama variada de missões, cumprindo as tarefas específicas da aviação de caça, transporte, patrulha marítima, reconhecimento, busca e salvamento, contraterrorismo, garantia da lei e da ordem, e defesa antiaérea (BRASIL, 2018). A Figura 1 apresenta a distribuição geográfica dessas unidades no território brasileiro.

Figura 1 - Localização das unidades operacionais da Força Aérea Brasileira



Fonte: (BRASIL, 2020)

3.1.1 Avanços tecnológicos e modernização da Força Aérea Brasileira

A Força Aérea do futuro depende de constante desenvolvimento e investimentos na área de Ciência, Tecnologia e Inovação. A Força Aérea 100, documento que apresenta a concepção estratégica da FAB até 2041, estabelece a visão de futuro da Instituição: “Uma Força Aérea de grande capacidade dissuasória, operacionalmente moderna e atuando de forma integrada para a defesa dos interesses nacionais” (BRASIL, 2018, p. 20).

Buscando ampliar sua capacidade operacional e acompanhar os avanços tecnológicos mundiais, a instituição tem investido na modernização de seus vetores aéreos. A aquisição do avião de transporte KC-30 amplia a capacidade da FAB em ações estratégicas nacionais e internacionais, como reabastecimento em voo, apoio logístico, ações humanitárias e evacuação aeromédica (BRASIL, 2022b).

A incorporação do avião de caça F-39 Gripen também representa um marco histórico para o País:

Com a junção de um dos mais modernos aviões de caça do mundo com os inteligentes mísseis IRIS-T e *Meteor*, a FAB passa a ter um sistema de defesa nunca visto antes, isto é, um divisor de águas, pois vai aumentar o poder de dissuasão e oferecer inquestionável superioridade aérea para os pilotos na defesa do território nacional (BRASIL, 2022c, p. 4).

A aviação de asas rotativas também acompanha o avanço tecnológico. Em setembro de 2022 foi assinado um contrato de renovação da frota de instrução básica. Esse acordo permitirá a aquisição de 12 aeronaves H-125, em substituição dos helicópteros H-50 Esquilo (BRASIL, 2022b).

Além da aquisição das novas aeronaves, a FAB é detentora do KC-390 Millennium, considerado o maior avião militar multimissão do hemisfério sul e caracterizado por elevada eficiência e versatilidade. Emprega aeronaves remotamente pilotadas, tecnologia que proporcionou novas perspectivas e capacidades para a aviação de reconhecimento. Ainda, possui em sua frota o SC-105 que, com seus equipamentos e sensores embarcados, é capaz de detectar aeronaves acidentadas no período noturno ou pessoas ao mar, ampliando a capacidade de busca e salvamento (BRASIL, 2022d).

Nota-se, assim, a missão da FAB alinhada com a visão de futuro. No entanto, os operadores desses equipamentos (pilotos, tripulantes e equipes de apoio) devem ser capazes de operar as tecnologias disponíveis em sua amplitude.

Uma Força Aérea eficiente é feita da união de aeronaves e sistemas d'armas adequados e com tripulações devidamente capacitadas. Significa dizer que de nada adianta possuir o melhor equipamento existente se não houver o treinamento adequado para aqueles que conduzirão as operações aéreas (BRASIL, 2018, p. 35).

Por meio da formação e capacitação adequada, os pilotos da FAB adquirem conhecimentos teóricos, habilidades técnicas e experiência prática necessários para operar aeronaves de forma segura e eficiente, garantindo a prontidão e eficácia das operações aéreas.

3.1.2 A formação e especialização do piloto da Força Aérea Brasileira

A Academia da Força Aérea (AFA), sediada em Pirassununga – SP, é a instituição responsável por formar os Oficiais Aviadores da FAB. O Curso de Formação de Oficiais Aviadores (CFOAV) tem a duração de quatro anos, em regime de internato. De forma geral, os futuros oficiais recebem instruções relativas ao desenvolvimento da cultura geral e militar, com ênfase em liderança. Ao final, é conferida a graduação de Bacharel em Administração, com ênfase em Administração Pública (BRASIL, 2022a).

Além da formação militar, o CFOAV também proporciona o contato inicial com a atividade aérea. São ministradas instruções teóricas e práticas, seguindo um programa de treinamento que avalia o desempenho e seleciona o aviador, preparando-o para a pilotagem

militar. Atualmente, os cadetes recebem instruções de voo no 2º e 4º anos do CFOAV, nas aeronaves T-25 (Neiva) e T-27 (Embraer). Ao término, além do Bacharel em Administração, é conferida a graduação de Bacharel em Ciências Aeronáuticas, com ênfase em Aviação Militar (BRASIL, 2022a).

Após a conclusão do curso, os Oficiais Aviadores são distribuídos nas diferentes aviações (caça, transporte, asas rotativas e Inteligência, Vigilância e Reconhecimento – IVR) e prosseguem para Parnamirim – RN para realizar o curso de especialização na aviação que irão atuar (BRASIL, 2017). O curso de especialização conta com instruções teóricas e práticas e envolve os conhecimentos básicos da maioria das missões cumpridas pela respectiva aviação.

Os aviadores que seguem para a aviação de caça são transferidos para o 2º/5º Grupo de Aviação (GAV), chamado de Esquadrão Joker. Nessa unidade, aprendem a operar o A-29 Super Tucano, tornando-se, ao término, pilotos de combate. Então, são transferidos para um dos esquadrões de caça, localizados em Boa Vista (RR), Porto Velho (RO) e Campo Grande (MS), onde “além de defender o espaço aéreo brasileiro e as fronteiras do País, recebem instruções importantes de Liderança de Elemento, Esquadrilha e Esquadrão, podendo, na sequência, ser transferidos para os esquadrões de primeira linha”, os quais operam as aeronaves F-5M, A-1M e F-39 (BRASIL, 2022c).

Aqueles que seguem para a aviação de asas rotativas, são destinados ao 1º/11º GAV, denominado Esquadrão Gavião. O treinamento é realizado na aeronave H-50 e os pilotos realizam missões diurnas e noturnas, familiarizando-se com as técnicas e táticas de emprego do helicóptero. Ao término, estão prontos para empregar a aeronave em sua totalidade, realizando operações em áreas restritas, transporte de carga externa, formatura tática e missões de busca e salvamento, ataque e evacuação aeromédica. São então destinados a um dos esquadrões de asas rotativas, localizados em Santa Maria (RS), Rio de Janeiro (RJ), Manaus (AM), Natal (RN), Campo Grande (MS) e Porto Velho (RO), nos quais irão operar os helicópteros H-60L ou H-36 (BRASIL, 2017).

Por fim, os Oficiais que irão se especializar nas aviações de transporte ou IVR, são transferidos para o 2º/5º GAV, Esquadrão Rumba, e receberão instruções na aeronave C-95M Bandeirante. Após a especialização, os pilotos de transporte têm a possibilidade de operar as aeronaves C-95M Bandeirante, C-98 Caravan, C-97 Brasília, C-99, C-105 Amazonas, C-130 Hércules, KC-390 e KC-30 (BRASIL, 2021). Por sua vez, aqueles que são designados para a aviação de IVR, terão a oportunidade de operar as aeronaves P-95 Banderulha e P-3M Orion, cumprindo missões de patrulha marítima em uma área de 13,5 milhões de quilômetros quadrados (BRASIL, 2023). Poderão, ainda, progredir operacionalmente para cumprir missões

de reconhecimento, voando as aeronaves R-35M, R-99, E-99 e as aeronaves remotamente pilotadas RQ 450 e RQ 900, dotadas de sistemas de elevada complexidade e capacidade de vigilância (BRASIL, 2021).

A FAB conta ainda com aviões de transporte especial (VH-35, VC-1 e VC-2) e inspeção em voo (IU-50 e IU-93A). Para seguir para esses Esquadrões, os pilotos passam por criteriosa seleção, na qual serão analisados experiência de voo, operacionalidade, além de aspectos relacionados à disciplina, conduta militar e moral do Oficial.

Nota-se que, independentemente da aviação, os pilotos da FAB são preparados para empregar vetores aéreos de elevada capacidade e tecnologia em sua plenitude.

As aeronaves modernas voadas pela FAB chegam a embarcar cerca de 30 sistemas operacionais básicos, considerando apenas os que o piloto deve estar apto a operar (ex.: aviônica, que é a interface piloto-aeronave; sistema de alerta; de iluminação; de combustível; de freio; de oxigênio; de proteção contra gelo; de navegação; de comunicação; etc) (Elias, 2017).

A pilotagem da aeronave em conjunto com a operação de sistemas embarcados complexos gera alta carga de trabalho. Portanto, o treinamento rigoroso e contínuo é fundamental para que os pilotos adquiram as habilidades necessárias para realização das missões com eficácia e segurança, contribuindo para a defesa e segurança do Brasil.

3.2 Carga de trabalho

Os desafios de mensurar a carga de trabalho surgem com a dificuldade inicial de definir o próprio conceito, o qual assume significados diversos para diferentes áreas do conhecimento. O termo em questão remete não apenas à quantidade de tarefas a serem realizadas, mas também à carga que um indivíduo pode experimentar durante a execução do trabalho. Alguns encaram a carga de trabalho como algo físico, enquanto outros a percebem mais como uma atividade mental ou pressão temporal (CASNER; GORE, 2010).

Na área do esporte, por exemplo, encontra-se um conceito bastante similar, denominado carga de treinamento, descrita como uma variável que pode ser manipulada para se obter a resposta de treino desejada. Esse conceito é dividido em carga interna e carga externa, dependendo se os aspectos mensurados ocorrem interna ou externamente ao atleta. Nesse contexto, carga externa é o trabalho físico realizado pelo indivíduo (por exemplo: quantidade de peso levantada ou distância percorrida – variáveis relacionadas à tarefa), enquanto a carga interna representa o custo fisiológico e psicológico (variáveis relacionadas ao indivíduo) causado pela exposição à carga externa (Impellizzeri; Marcora; Coutts, 2019). Assim, atletas que repetem a mesma sessão de treinamento em dias diferentes podem apresentar a mesma velocidade durante um treino de corrida (carga externa), porém experimentar valores de FC e

lactato sanguíneo diferentes (carga interna), de acordo com o estado de fadiga, perturbações emocionais, doenças, entre outros fatores (Bourdon *et al.*, 2017; Stephenson *et al.*, 2021).

Similarmente, no contexto aeronáutico, Veltman e Gaillard (1996) relacionam o conceito a dois fatores: demanda da tarefa e capacidade do operador. Assim, a demanda da tarefa provê informações relativas às causas da carga de trabalho, enquanto a capacidade do operador refere-se ao esforço para execução da tarefa. No entanto, o ser humano possui uma capacidade finita para processamento de informações. Aumento da dificuldade na tarefa ocasiona aumento dos recursos cognitivos despendidos para sua execução. Quando o processamento de informações excede a capacidade disponível, o resultado é o excesso de carga, o que pode resultar em queda de performance. Nesse sentido, de acordo com O'Donnell e Eggemeier (1986), a carga de trabalho refere-se à capacidade limitada do operador para realizar determinada tarefa.

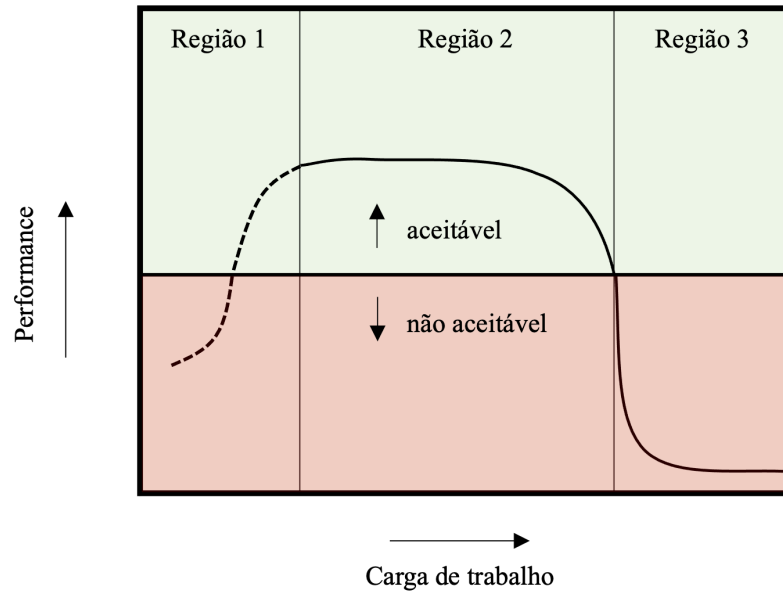
Por sua vez, para Hart e Staveland (1988) a definição de carga de trabalho está centrada no indivíduo e não na tarefa. Nesse sentido, a carga de trabalho é o custo para um operador humano atingir um nível particular de performance. Para os autores, a percepção da carga de trabalho é subjetiva e depende de diversos fatores além das demandas objetivas da tarefa, como habilidades, comportamentos e percepções do operador, bem como das circunstâncias em que a tarefa é realizada.

Nessa perspectiva, existe a demanda pretendida e a demanda real. A demanda pretendida está relacionada à carga de trabalho imposta pela tarefa, moldada por seu objetivo, duração, estrutura e recursos fornecidos. Entretanto, quando um indivíduo específico executa a tarefa, diversos fatores podem modificar a carga de trabalho exclusivamente para aquela ocorrência, como o ambiente externo, falhas do sistema e erros do operador. Esses fatores acidentais ocasionam alteração na carga de trabalho e definem a demanda real para determinada situação. Assim, os operadores são guiados pelas demandas impostas, mas são influenciados por suas percepções e esforço, o que constitui o fator subjetivo e variável da carga de trabalho (Hart; Staveland, 1988).

Dessa maneira, a carga de trabalho está relacionada tanto à dificuldade da tarefa, como ao esforço do operador para manter o desempenho. No entanto, Lysaght *et al.* (1989) ressaltam que o conceito de carga de trabalho não pode ser confundido com performance. A Figura 2 ilustra a diferença entre os dois conceitos. Com uma carga de trabalho excessivamente baixa (região 1), o operador torna-se entediado, resultando em desempenho ruim. Com o incremento das demandas, a performance atinge um nível aceitável. A partir de então, o operador intensifica o esforço para manter a alta performance mesmo com o aumento da carga de trabalho. Porém,

o indivíduo só é capaz de aumentar o esforço até certo limite, momento que ocorre queda no desempenho devido ao excesso de carga de trabalho.

Figura 2 - Relação hipotética entre carga de trabalho e performance



Fonte: Adaptado de Lysaght et al. (1989, p. 10)

Em resumo, o conceito de carga de trabalho é complexo e não existe uma definição universal. A ICAO define o termo como atividade mental ou física, relacionada a três aspectos principais: natureza e quantidade de trabalho a ser executado; demanda temporal; e fatores relacionados à capacidade de desempenho do indivíduo, como experiência, nível de habilidade, esforço, etc (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2016). Essa será a definição utilizada no presente trabalho.

3.2.1 Carga de trabalho do piloto

Segundo a definição da ICAO, a carga de trabalho do piloto pode se manifestar de forma física ou mental, sendo que o excesso dessas demandas pode impactar na segurança do voo. A condução de aeronaves de asas rotativas, por exemplo, é reconhecida por demandar habilidades psicomotoras das mãos e dos pés. Estudos como o de McMagon e Newman (2018) destacam que pilotos de helicóptero evidenciaram deterioração significativa no desempenho psicomotor dessas extremidades após múltiplos ciclos de voo, sendo os pés mais afetados que as mãos, demonstrando como o excesso de carga de trabalho física pode impactar no cumprimento seguro da missão.

A busca por redução da carga de trabalho do piloto na aviação remonta aos primórdios, impulsionada pelo objetivo de incorporar tecnologias aos sistemas embarcados das aeronaves.

Inicialmente, a introdução de instrumentos básicos como altímetros, horizontes artificiais e velocímetros visava proporcionar uma consciência situacional aprimorada ao piloto, fornecendo indicações básicas. Com o avanço tecnológico e o aumento do porte das aeronaves, foram implementados sistemas de amplificação de força, como os hidráulicos (Chialastri, 2012), e o piloto automático, possibilitando que a aeronave mantivesse altitude, voasse até um ponto ou realizasse um pouso, tudo sem intervenção mecânica direta do piloto (Gouraud; Delorme; Berberian, 2017).

No campo cognitivo, a incorporação de alarmes visuais para indicar quando algum limite é excedido, radares meteorológicos, instrumentos de navegação e auxílios para pouso também contribuíram para a elevação da capacidade das aeronaves. Contudo, um número crescente de sistemas passou a ser monitorado pelos pilotos, dando origem a uma nova preocupação: o excesso de informações (Chialastri, 2012). Nota-se, assim, uma modificação da carga de trabalho do piloto, a qual passa a enfrentar novos desafios.

A automação dá origem a um paradoxo: a baixa carga de trabalho durante o voo, pode levar à complacência, uma vez que os pilotos tendem a deixar os sistemas automáticos atuarem, reduzindo o estado de alerta e consciência situacional. Esse fenômeno pode levar a um estado de fadiga, denominado fadiga passiva. Por sua vez, uma carga de trabalho elevada pode exceder a capacidade individual, devido ao elevado número de interações, dados e sistemas que deve monitorar, sendo denominada fadiga ativa (Chialastri, 2012; Wingelaar-Jagt *et al.*, 2021).

Como exemplo, esse paradoxo ficou evidente no acidente do voo 447 da Air France. Em 31 de maio de 2009, a aeronave decolou do Rio de Janeiro com destino a Paris, transportando 228 pessoas. Ao ingressar em uma zona de turbulência, o indicador de velocidade sofreu uma queda abrupta devido ao congelamento das sondas de Pitot, desativando o piloto automático e exigindo a intervenção manual da tripulação. Os pilotos prontamente assumiram os comandos do avião, entretanto, devido à interpretação ineficaz dos instrumentos, dos sistemas de alarme e de ações decorrentes inapropriadas, o avião entrou em estado de estol (perda de sustentação) e colidiu com o mar aproximadamente 4 minutos depois. Mesmo diante das múltiplas indicações no painel da aeronave alertando para a perda de sustentação, as manobras de recuperação não foram implementadas, destacando a dificuldade de interpretar as diversas informações fornecidas pelos sistemas embarcados, especialmente em situações críticas de elevada carga de trabalho, como as emergências (Rocha; Lima, 2018).

É nesse contexto que o estudo da carga de trabalho vivenciada pelo piloto durante a atividade aérea torna-se fundamental. O conceito está relacionado e é influenciado por alguns fatores principais. Os primeiros são aqueles relacionados à tarefa, influenciados pela missão,

pelo ambiente e pelo *design* da estação de trabalho (Lysaght *et al.*, 1989). Em um voo de helicóptero, por exemplo, cada procedimento conta com uma sequência de ações, definida em manual específico. Em cada momento do voo, o piloto executa um tipo de ação diferente. Por exemplo: para manter o voo pairado, o piloto precisa monitorar o altímetro (instrumento que indica altitude) e observar referências externas à aeronave, enquanto atua nos comandos para manter a aeronave sobre o mesmo ponto, com o mínimo de variação possível.

Além do tipo, da sequência e da quantidade de tarefas, outro fator que influencia a carga de trabalho é o tempo disponível para a realização de uma ação (Lysaght *et al.*, 1989). Emergências, por exemplo, demonstram exigir mais dos pilotos, devido a necessidade de um rápido processamento de informações e execução das ações necessárias para tirar a aeronave da condição de perigo (Santos *et al.*, 2022).

Fatores ambientais também influenciam a tarefa. Uma mesma missão, realizada pelo mesmo piloto, porém em circunstâncias diferentes, podem propiciar cargas de trabalho distintas. Um voo noturno, por exemplo, tende a ser mais exigente que um voo realizado durante o dia (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a). Do mesmo modo, fatores como temperatura, umidade, ruído, iluminação e meteorologia também irão influenciar a carga de trabalho do operador (Lysaght *et al.*, 1989).

Ainda, o *design* da aeronave, ou seja, o tamanho das telas, posicionamento dos instrumentos, tipo de controles de voo, iluminação interna, ventilação, controle de vibração, entre outros, irão influenciar no cumprimento da tarefa (Lysaght *et al.*, 1989). Assim, em uma determinada missão, uma aeronave que possua piloto automático, por exemplo, exigirá do piloto a ação de configurar e monitorar o procedimento, enquanto um avião não equipado com esse recurso exige que o piloto atue nos comandos para, de fato, comandar a aeronave. Em cada um dos casos, a carga de trabalho e o esforço do piloto para manter o desempenho serão distintos (Chialastri, 2012).

Além dos fatores relacionados à tarefa, cada operador carrega algumas influências que podem impactar a performance. Algumas dessas influências são mais facilmente modificadas, como tempo de descanso e treinamento. Outras, demoram mais tempo para serem alteradas, como capacidade de processamento cognitivo, que será influenciada pela experiência e conhecimento (Lysaght *et al.*, 1989).

A interação de todos esses fatores determinará a carga de trabalho do piloto e, conseqüentemente, o desempenho da missão. Entretanto, quantificar essa carga de trabalho em ambientes complexos, como a atividade aérea, é um desafio. Assim, estudos apontam diferentes

técnicas, cada uma com suas vantagens e aplicações (O'DONNELL; EGGEMEIER, 1986; VELTMAN; GAILLARD, 1996).

3.2.2 Métodos para avaliar carga de trabalho

De acordo com O'Donnell e Eggemeier (1986), técnicas para quantificar carga de trabalho podem ser divididas em três grupos principais: escalas subjetivas, medidas baseadas em performance e medidas fisiológicas.

As escalas subjetivas dependem da capacidade do operador de julgar e reportar a própria carga de trabalho na execução de uma tarefa. São escalas de fácil implementação, não-invasivas e, geralmente, capazes de fornecer informações a respeito da carga de trabalho total do operador, podendo ser utilizadas no contexto da aviação (O'Donnell; Eggemeier, 1986; Veltman; Gaillard, 1996b). No entanto, em muitos casos, como durante a realização do voo, o operador não terá tempo para preencher um formulário ou responder a uma escala em tempo real, tornando-se dependente da reconstrução mental do cenário. Desse modo, a avaliação ficará limitada ao que o indivíduo é capaz de lembrar (Hart; Staveland, 1988).

Ainda assim, para Hart e Staveland (1988), as escalas subjetivas fornecem a única fonte de informação sobre o impacto subjetivo de uma tarefa nos operadores e integra os efeitos de muitos contribuintes da carga de trabalho, sendo o indicador mais sensível para explorar as demandas mentais. Nesse contexto e com o intuito de avaliar a carga de trabalho em ambientes complexos, os autores desenvolveram o questionário *NASA Task Load Index* (NASA-TLX).

O método relaciona-se com seis dimensões constituintes da carga de trabalho geral: carga mental, exigência física, exigência temporal, desempenho, esforço e frustração. Para os autores, a percepção de carga de trabalho é subjetiva, centrada no indivíduo e depende da influência de muitos fatores, além das demandas objetivas impostas pela tarefa. Assim, a carga de trabalho depende da interação entre as exigências da tarefa, das circunstâncias em que são executadas, das habilidades, dos comportamentos e das percepções do operador (Hart; Staveland, 1988). Ainda que não seja o foco da presente pesquisa, faz-se necessário destacar que, após duas décadas de utilização, o NASA-TLX é considerado referência na avaliação subjetiva da carga de trabalho na aviação (Hart, 2006), portanto algumas pesquisas (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019a; Mendes *et al.*, 2021) utilizaram o questionário em conjunto com outros métodos de análise da carga de trabalho.

Por sua vez, medidas baseadas em performance apontam o desvio de algum índice do comportamento do operador ou atividade. São divididos em dois subgrupos: o primeiro analisa a capacidade do operador de realizar a atividade principal (por exemplo, a quantidade de erros

cometida pelo piloto enquanto opera uma aeronave); o segundo analisa a capacidade do operador em realizar uma atividade secundária, ao mesmo tempo em que realiza a atividade principal (como exemplo, responder o rádio de comunicação enquanto pilota a aeronave) (O'Donnell; Eggemeier, 1986). A desvantagem desse tipo de medida está na diferença do conceito de performance e carga de trabalho. Quando submetidos a altas demandas, os operadores investem mais esforço para manter o desempenho. Assim, medidas baseadas em performance não refletem esse esforço adicional e, conseqüentemente, a carga de trabalho total do indivíduo (Veltman; Gaillard, 1996b).

Por fim, medidas fisiológicas inferem o nível da carga de trabalho por meio da resposta psicofisiológica do operador. Podem incluir respostas autonômicas, respostas do sistema nervoso central ou medidas periféricas (O'Donnell; Eggemeier, 1986). É uma ferramenta valiosa para obter a carga de trabalho no momento da ação, principalmente em ambientes reais, pois fornece métricas objetivas e contínuas (Veltman, 2002). No entanto, esse método também possui desvantagens: pode ser influenciado por artefatos e fatores de confusão; não existe uma única medida universalmente válida para acessar carga de trabalho em diferentes cenários; os equipamentos utilizados não podem interferir com a segurança de voo. Apesar disso, o desenvolvimento de equipamentos de medição mais modernos vem permitindo coletar um número considerável de sinais fisiológicos com boa qualidade, como por exemplo a FC, VFC, pressão arterial, taxa de respiração e piscar de olhos (Alaimo *et al.*, 2022; Veltman, 2002).

Desse modo, conhecendo os métodos, suas limitações e aplicabilidades, torna-se possível avaliar a carga de trabalho do piloto, levando em consideração as demandas da tarefa, as características do operador e as influências externas que afetam o desempenho da missão.

3.3 Variabilidade da Frequência Cardíaca

Do número grandioso de variáveis fisiológicas disponíveis para uso em laboratórios, apenas algumas podem ser utilizadas em voos reais. É o caso da VFC, técnica não-invasiva e de utilização simples. Nas últimas décadas, observa-se sua ampla aplicabilidade como forma de mensuração do SNA em ambientes estressantes, como combate (Delgado-Moreno *et al.*, 2019), paraquedismo (Clemente-Suárez; Robles-Pérez; Fernández-Lucas, 2017), câmara hipobárica (Bustamante-Sánchez *et al.*, 2018) e atividade aérea real (Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019) ou simulada (Villafaina *et al.*, 2021).

A ampla possibilidade de uso e a facilidade para aquisição de dados caracterizam esse recurso. Destaca-se também que a apresentação de informações atuais referentes à VFC como conceitos, modelos de análise, formas de interpretação de resultados e análise clínica, constitui um auxílio tanto para pesquisadores, quanto para clínicos que atuam nas diversas áreas da saúde (Vanderlei *et al.*, 2009, p. 206–207).

O coração, como o órgão central responsável pelo transporte sanguíneo no organismo humano, é alvo de uma dupla inervação proveniente do sistema nervoso simpático e parassimpático (vagal). Esses sistemas são influenciados por barorreceptores, quimiorreceptores, bem como pelos sistemas respiratório, vasomotor, termorregulador e renina-angiotensina-aldosterona (Marães, 2010). Devido a essa complexa interação, os batimentos cardíacos não seguem um ritmo absolutamente regular, variando de acordo com diversos fatores, como estresse físico e mental, respiração, controle da pressão arterial, regulação térmica, ritmos circadianos, entre outros (Stein *et al.*, 1994). Nesse sentido, para indivíduos saudáveis e em condições normais, o intervalo entre batimentos consecutivos não é constante. Essa variação é denominada variabilidade da frequência cardíaca (Alaimo *et al.*, 2022).

A observação da VFC permite identificar os mecanismos de regulação das funções fisiológicas, relacionadas ao SNA. O equilíbrio desse sistema reflete a capacidade de adaptação do organismo a estímulos externos (Alaimo *et al.*, 2022). De forma geral, quando uma situação de estresse é percebida, o SNA ativa a modulação simpática (Bustamante-Sánchez *et al.*, 2020). Quando o estímulo estressor desaparece, a homeostase é restabelecida por meio da ativação dos componentes parassimpáticos (Acharya *et al.*, 2006). Nesse sentido, alta VFC é sinônimo de boa adaptação e de um sistema nervoso saudável (Pumprla *et al.*, 2002), pois indica a capacidade do organismo em responder aos estímulos fisiológicos e patológicos e retornar à homeostase (Marães, 2010).

A análise da VFC é realizada a partir de uma série de cálculos matemáticos com base no intervalo entre batimentos cardíacos consecutivos, também conhecido como intervalo RR ou IBI (do inglês: *Interbeat interval*), sendo dividida em métodos lineares (domínio do tempo e da frequência) e métodos não-lineares (Marães, 2010). Dentre os métodos não-lineares utilizados, destaca-se: plot de Poincaré, análise de flutuações depuradas de tendências, entropia aproximada, entropia da amostra e função de correlação (Shaffer; Ginsberg, 2017; Vanderlei *et al.*, 2009). O tipo de análise dependerá do tipo de registro obtido. Métodos lineares podem ser utilizados com registros de curto (2, 5, 15 minutos) ou longos períodos (24 horas), sendo um mínimo de 256 intervalos RR recomendados. Por sua vez, para análises não-lineares, recomenda-se um número maior, em torno de 1000 intervalos RR (Marães, 2010; Vanderlei *et al.*, 2009).

O Quadro 1 apresenta os principais índices da VFC utilizados e seu relacionamento com a atividade autonômica.

Quadro 1 - Principais índices da variabilidade da frequência cardíaca

Método de análise	Índice	Descrição	Influência autonômica
-------------------	--------	-----------	-----------------------

Domínio do tempo	SDNN	Desvio padrão de todos os intervalos RR normais gravados em um intervalo de tempo (ms)	Simpática e parassimpática
	RMSSD	Raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes em um intervalo de tempo (ms)	Parassimpática
	pNN50	Porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms	Parassimpática
	HRVti	Índice triangular	-
Domínio da frequência	ULF	Componente de ultrabaixa frequência (<0,003 Hz)	Simpática e parassimpática
	VLF	Componente de muito baixa frequência (0,0033 a 0,04 Hz)	-
	LF	Componente de baixa frequência (0,04 a 0,15 Hz)	Simpática predominantemente e parassimpática
	HF	Componente de alta frequência (0,15 a 0,4 Hz)	Parassimpática
	LF/HF	Razão LF/HF	Balço simpato-vagal
	TOTpow	Potência total	-
Medidas não-lineares	SD1	Dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré (ms)	Parassimpática
	SD2	Dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré (ms)	Simpática e parassimpática
	SampEn	Entropia da amostra	-
	α_1	Expoente de escalonamento fractal de curto prazo	-

Fonte: o autor, baseado em Marães (2010); Shaffer e Ginsberg (2017); Vanderlei et al. (2009)

De acordo com Alaimo (2022), os índices da VFC são intimamente relacionados ao SNA, refletindo o estado de estresse psicológico nas pessoas, além de serem sensíveis a mudanças relacionadas às demandas da atividade e esforço exigido. Portanto, são amplamente utilizadas como indicadores da carga de trabalho. Na aviação, informações relevantes referentes à carga de trabalho podem ser identificadas a partir da análise da VFC. A compreensão do estado geral do piloto por intermédio da VFC, permite identificar os momentos de maior estresse do voo, o tempo de recuperação do SNA, além de fornecer informações valiosas sobre as demandas da atividade aérea, sendo fundamental para ampliar o conhecimento da carga de trabalho e, assim, aprimorar o desempenho humano no ambiente de pilotagem militar.

4 METODOLOGIA

Esse estudo foi conduzido de acordo com as recomendações do PRISMA para revisões de escopo (PRISMA-Scr) (Tricco *et al.*, 2018) e com o guia metodológico atualizado para condução de revisões de escopo (Peters *et al.*, 2020).

4.1 Estratégia de busca

As buscas foram conduzidas sistematicamente nas bases de dados MEDLINE (Via PubMed), SCOPUS e LILACS, entre setembro de 2022 e fevereiro de 2023. Para delimitar a pergunta orientadora da pesquisa, utilizou-se a estratégia PECOS:

1. População: pilotos militares
2. Exposição: atividade aérea
3. Controle: não aplicável
4. Desfecho (*outcomes*): alterações na variabilidade da frequência cardíaca
5. Desenho do estudo (*study design*): não aplicável

Os estudos foram identificados utilizando uma combinação dos descritores MeSH, sinônimos e outros termos: “Heart rate” OR “Heart rate control” OR “Heart rate variability” OR “HRV” OR “Physiological” OR “Psychophysiological” AND “Pilots” OR “Aviator” OR “Co-pilot” OR “Co pilot” OR “Aircraft” OR “Airplane” OR “Helicopter” OR “Aviation” OR “Flight” OR “Crew” OR “Flight simulator” AND “military” OR “military personnel” OR “coast guard” OR “air force personnel” OR “armed forces personnel” OR “soldier”. A equação foi modificada para obedecer aos requerimentos específicos de cada base de dados (Apêndice A).

4.1.1 Critérios de elegibilidade

A pesquisa foi limitada a artigos publicados na língua inglesa. Foram incluídos os registros dos últimos 20 anos (2002-2022) que analisaram a VFC em pilotos militares durante a atividade aérea (real ou simulada). Os critérios de inclusão foram: 1) VFC coletada durante a atividade aérea; 2) análise da VFC no domínio do tempo, frequência ou métodos não-lineares. Adicionalmente, foram excluídos os artigos nos quais: 1) as amostras não eram constituídas de pilotos militares; 2) os indivíduos não executavam a atividade de pilotagem.

4.2 Extração de dados

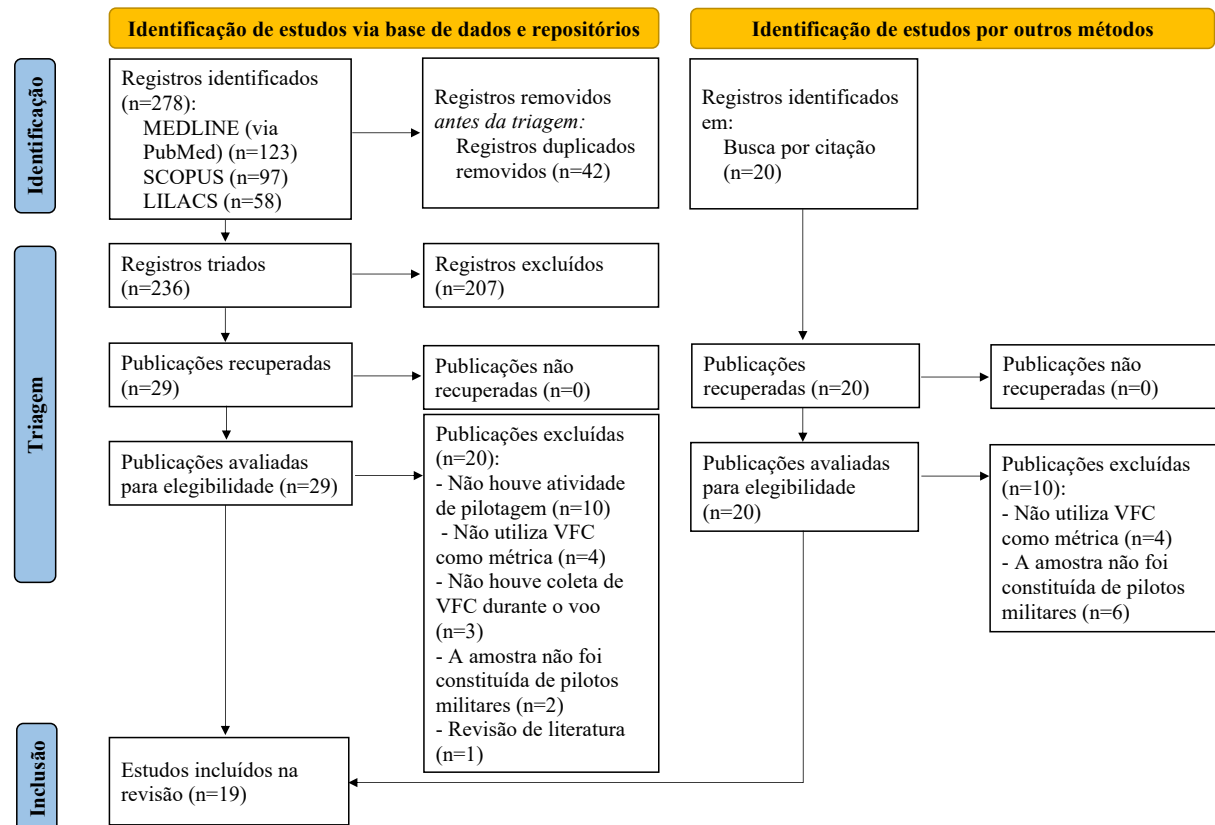
Dois pesquisadores conduziram a pesquisa nas bases de dados de forma independente, aplicando os critérios de elegibilidade. A triagem inicial, leitura de títulos e resumos e remoção de duplicatas foi realizada com a utilização do software Rayyan. Posteriormente, a leitura dos textos completos e extração dos dados foram realizadas manualmente por meio do programa Mendeley, utilizando as caixas de texto para elucidação das razões de exclusão e destaque das principais contribuições do estudo.

As seguintes informações foram extraídas: autores, ano e país da publicação, amostra, índices da VFC analisados, perfil do voo e principais contribuições. O foco foi evidenciar as alterações na modulação autonômica produzida por cada perfil de voo (real ou simulado).

5 RESULTADOS

O quantitativo de registros obtidos, fases do processo de busca e razões de exclusão estão especificados na Figura 3. Foram obtidos 298 registros, dos quais 19 foram incluídos na revisão. Desses, sete são da Espanha, quatro da Finlândia, dois do Brasil, um de Portugal, um da República Tcheca, um da Polônia, um da Suécia, um da França e um da China.

Figura 3 - Fluxograma de busca



Fonte: o autor

Na fase de inclusão e exclusão por leitura de títulos e resumos, o nível de concordância entre os autores foi moderado ($k=0,667$). Após a leitura completa, as discordâncias remanescentes foram sanadas por um terceiro revisor.

A síntese da extração de dados foi dividida em três quadros (Quadros 2, 3 e 4), de acordo com o tipo de voo analisado: voos reais, voos simulados e comparação entre os dois tipos de voo, respectivamente.

5.1 Voo real

As alterações autonômicas produzidas por cada perfil de voo são apresentadas no Quadro 2. Sete estudos (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a; Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019; Mendes *et al.*, 2021; Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009; Skibniewski *et al.*, 2015; Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez, 2021) analisaram as

alterações autonômicas de pilotos militares durante a realização de voos reais. Desses, dois foram realizados em aeronaves de asas rotativas (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a; Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez, 2021), dois em aviões de caça (Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019; Oliveira-Silva; Boullosa, 2015) e três em aeronaves de asa fixa (Mendes *et al.*, 2021; Sauvet *et al.*, 2009; Skibniewski *et al.*, 2015).

Quadro 2 - Alterações autonômicas no voo real

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Sauvet <i>et al.</i> (2009)	Voo de longa duração (3h30min) realizado em aeronave de asa fixa (Piper Pa28)	10 pilotos novatos da Força Aérea da França	RR, SDNN, RMSSD, SD1, SD2, LF, HF, LF+HF, LF/HF	Comparação entre pré voo e voo	↓ SDNN, ↓ SD1, ↓ SD2, ↑ LF, ↓ HF, ↓ LF+HF, ↑ LF/HF
				Comparação entre dia controle e voo	↓ RR, ↓ SDNN, ↓ SD2, ↑ LF, ↓ HF, ↑ LF/HF
				Comparação entre dia controle e pós voo	↓ RR, ↓ SDNN, ↓ SD1, ↓ SD2
Oliveira-Silva; Boullosa (2015)	Voo de treinamento em avião de caça de alta performance (Mirage 2000)	11 pilotos experientes da Força Aérea Brasileira	FC média, SDNN, RMSSD, SD1, SD2, SampEn, $\alpha 1$	Comparação entre pré voo e voo	↑ FC média, ↑ SDNN, ↓ RMSSD, ↓ SD1
				Comparação entre dia controle e voo	↑ FC média, ↑ SDNN, ↓ RMSSD, ↓ SD1, ↓ SD2
				Comparação entre dia controle e pós voo	↓ RMSSD
Skibniewski <i>et al.</i> (2015)	Voo de manobras e acrobacias em aeronave de asa fixa (PZL-130TC-1/TC-2)	59 cadetes do 2º ano da Academia da Força Aérea da Polônia	LF/HF	Comparação entre pré voo e voo	↑ LF/HF
				Comparação entre voo e pós voo	↓ LF/HF
				Comparação entre voo assistido por instrutor ou não assistido	-

(continuação)

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez (2019)	Voo de combate aéreo, constituído de manobras ofensivas e defensivas, realizado em avião de caça de alta performance (F-5)	29 pilotos da Força Aérea da Espanha	FC média, Max HR, pNN50, RMSSD, LF, HF, LF/HF, SD1, SD2	Comparação entre pré voo e voo	↑ FC média
				Comparação entre voo e pós voo	↓ FC média, ↓ FC max
Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez (2020a)	Voo noturno e voo por instrumentos em aeronave de asas rotativas	12 tripulantes do Exército da Espanha (8 pilotos e 4 mecânicos) e 11 civis sem experiência de voo (grupo controle)	pNN50, RMSSD, LF, HF	Comparação entre pré voo e voo (instrumento)	↓ RMSSD
				Comparação entre pré voo e voo (noturno)	-
				Comparação entre voo e pós voo (instrumento)	↑ RMSSD, ↑ LF
				Comparação entre voo e pós voo (noturno)	-
				Comparação entre pré voo (instrumento vs. noturno)	↓ pNN50, ↓ RMSSD, ↑ LF
Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez (2021)	Voo de resgate com guincho realizado em aeronave de asas rotativas (AS-332)	8 participantes da Força Aérea da Espanha (2 pilotos, 1 mecânico, 3 homens de resgate e 2 grupo controle)	FC média, pNN50, RMSSD, LF, HF, SD1, SD2.	Comparação entre pré voo e voo	↓ pNN50, ↓ RMSSD, ↓ SD1
				Comparação entre primeiro e último resgate	↑ RMSSD, ↑ pNN50, ↑ SD1
				Comparação entre voo e pós voo	↑ RMSSD, ↑ pNN50, ↑ SD1
Mendes <i>et al.</i> (2021)	Voo de lançamento de paraquedistas realizado em avião de transporte (C-95)	15 pilotos novatos da Força Aérea Brasileira	FC, RRi, SDNN, pNN50, RMSSD, LF, HF, LF/HF, TOTpow	Comparação entre pré e voo (piloto)	↑ FC, ↓ RR, ↓ TOTpow, ↓ RMSSD, ↓ SDNN, ↑ LF, ↓ HF, ↑ LF/HF
				Comparação entre pré e voo (co-piloto)	↑ HR, ↓ RR, ↓ RMSSD, ↑ LF, ↓ HF, ↑ LF/HF
				Comparação entre funções (piloto vs. copiloto)	↑ TOTpow, ↑ SDNN, ↓ LF/HF

RR/RRi: intervalo entre batimentos cardíacos; SDNN: desvio padrão de todos os intervalos RR normais; RMSSD: raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes; SD1: dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré; SD2: dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré; LF: componente de baixa frequência; HF: componente de alta frequência; LF/HF: relação entre LF e HF; FC média: frequência cardíaca média; SampEn: entropia da amostra, α 1: expoente de escalonamento fractal de curto prazo; FC max: frequência cardíaca máxima; pNN50: porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms; TOTpow: potência total; \uparrow : aumento significativo ($p < 0,05$); \downarrow : redução significativa ($p < 0,05$).

Fonte: o autor

Os estudos buscaram comparar FC e os diversos índices da VFC antes, durante e após a realização dos voos, buscando identificar como a atividade aérea afeta a modulação autonômica dos pilotos. Um perfil de voo de longa duração realizado em aeronave de asa fixa produziu aumento da atividade simpática, quando comparada a um dia controle (redução no intervalo RR, SDNN, SD2 e HF e aumento de LF e LF/HF) e diminuição da capacidade de vigilância. Entretanto, não houve correlação significativa entre os índices da VFC e a vigilância prejudicada (Sauvet *et al.*, 2009). Por sua vez, um voo de manobras e acrobacias resultou em aumento de 19% da razão LF/HF, quando comparada a valores anteriores à decolagem. Após o voo, houve redução de 9% em relação aos valores iniciais (Skibniewski *et al.*, 2015).

Similarmente, a realização de uma manobra de resgate com guincho conduzida em aeronave de asas rotativas, gerou aumento da atividade simpática da tripulação, independentemente da experiência de voo ou papel desempenhado. A maior modulação simpática (redução de 16% no RMSSD, 21% no pNN50 e 17% no SD1) foi observada quando o resgate era executado pela primeira vez, enquanto nas demais execuções houve pequena habituação às manobras estressoras, causando diminuição da modulação simpática e aumento da modulação parassimpática. Imediatamente após o voo, foi observado aumento de 37% no RMSSD, 52% no pNN50 e 37% no SD1 em relação aos valores observados antes do voo, indicando aumento da modulação parassimpática (Vicente-Rodriguez; Clemente-Suárez, 2021).

Manobras ofensivas e defensivas de combate aéreo produziram resposta psicofisiológica similar. Além disso, não foi observada diferença nos domínios do tempo, da frequência ou dos métodos não-lineares da VFC durante a atividade aérea, quando comparados com valores pré-voo. Contudo, o estudo não apresentou valores de VFC de um dia controle, não sendo possível estabelecer se os índices avaliados já se encontravam reduzidos no momento antecedente à atividade aérea (Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019).

Foi identificado um estudo que comparou dois diferentes perfis de voo na mesma aeronave de asas rotativas: voo noturno e voo por instrumentos. Quando analisado o momento pré-voo, a tripulação apresentou valores significativamente menores de RMSSD (54%) e

valores significativamente maiores de LF (20%) durante o período noturno. Durante e após o voo noturno, os índices da VFC permaneceram inalterados. Por sua vez, o voo por instrumentos resultou em redução significativa de 59% no RMSSD em relação ao momento pré. Em relação aos valores pós voo, houve redução significativa de 44% no RMSSD e de 48% no HF e aumento de 23% no LF além dos valores iniciais. Nessa pesquisa, a análise foi separada também pelas funções desempenhadas pelos tripulantes (pilotos, mecânicos e grupo controle). O grupo de pilotos (foco do presente estudo) não foi afetado pelo voo (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a).

Outra pesquisa (Mendes *et al.*, 2021) buscou analisar a modulação autonômica de pilotos de transporte, durante o lançamento de paraquedistas, em diferentes funções. Nesse estudo foram realizados dois voos, durante os quais os participantes ora exerceram a função de piloto, ora de copiloto. Os índices da VFC refletiram aumento da atividade simpática e diminuição da modulação parassimpática, principalmente quando os participantes voaram na função de piloto. Quando comparado os dois grupos, houve diferença significativa nos valores de TOTpow, SDNN e LF/HF. Além disso, observou-se as seguintes alterações autonômicas quando comparados o voo e o descanso: o intervalo RR reduziu 23% na função de piloto e 21% na função de co-piloto; o TOT_{POW} reduziu 60% somente no grupo de pilotos; a RMSSD apresentou redução de 56% em pilotos e 42% em co-pilotos; a LF aumentou 36% em pilotos e 30% em co-pilotos; a HF reduziu 62% na função de piloto e 53% na função de co-piloto; e a razão LF/HF apresentou aumento de 229% no grupo de pilotos e de 137% no grupo de co-pilotos.

Dois estudos (Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009) realizaram comparação entre o dia da atividade aérea e um dia controle, buscando identificar o tempo de recuperação do sistema nervoso autônomo. No voo de longa duração, a SDNN permaneceu reduzida por 2h30min após o voo e o intervalo RR e a SD1 por 5h (Sauvet *et al.*, 2009). Por sua vez, no voo de caça, somente o RMSSD permaneceu reduzido por 1h após o voo e não foi identificado efeito antecipatório ao voo. Esse último estudo também buscou verificar a influência dos componentes da aptidão física (potência aeróbia, determinada a partir do teste de Montreal “Université de Montréal Track Test”; força muscular, medida por meio do teste de 1RM dos exercícios supino, *leg press* e puxada alta; e composição corporal, obtida pela estatura, massa corporal e dobras cutâneas) e desidratação na resposta autonômica dos pilotos. Nesse sentido, foi observada correlação entre SampEn e potência aeróbia ($r=0,777$; $p=0,001$) e gordura corporal ($r=-0,617$; $p=0,030$). Além disso, uma maior desidratação foi correlacionada

a mudanças no RMSSD e no SD1 ($r=-0,610$ a $-0,810$; $p=0,044$ a $0,002$) (Oliveira-Silva; Boullosa, 2015).

Por fim, um estudo analisou se a presença do instrutor de voo produziria uma resposta autonômica diferente em relação a uma situação na qual o piloto encontrava-se voando sozinho, porém a presença ou não do instrutor no voo não afetou os parâmetros de VFC (Skibniewski *et al.*, 2015).

5.2 Voo simulado

Nove estudos (Fernández-Morales *et al.*, 2022; Kutilek *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022; Mansikka *et al.*, 2016a, 2016b; Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b, 2019a; Santos *et al.*, 2022; Villafaina *et al.*, 2021) utilizaram os diferentes índices da VFC para acessar a carga de trabalho mental do piloto. Nesse sentido, foram identificadas comparações entre os diversos segmentos do voo, procurando-se variações na VFC que indicassem maior ou menor exigência das tarefas. Foram analisadas aproximações por instrumentos (Mansikka *et al.*, 2016a, 2016b; Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b, 2019a), manobras básicas de voo (Li *et al.*, 2022), de ataque (Villafaina *et al.*, 2021) e de combate (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b), decolagens e pousos (Villafaina *et al.*, 2021), emergências (Fernández-Morales *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022) e voo de treinamento com tarefas inesperadas (Kutilek *et al.*, 2019). De forma geral, a VFC demonstrou-se sensível para identificar os diferentes níveis de exigência. As alterações autonômicas durante a realização de voos simulados estão sintetizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Alterações autonômicas no voo simulado

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Mansikka <i>et al.</i> (2016a)	Voo por instrumentos, constituído de uma emergência e três procedimentos de aproximação (VOR, ILS e PAR), realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F/A-18)	24 pilotos da Força Aérea da Finlândia	FC média, RR, SDNN, RMSSD, NN50, pNN50, HRVti, LF, HF, LF/HF	Comparação entre aproximação VOR e ILS	-
				Comparação entre procedimento monomotor e aproximação VOR/ILS	↑ FC média, ↓ RR
				Comparação entre manobras e aproximação VOR/ILS	↓ HVRtri
				Comparação entre decolagem e ingresso e aproximação VOR/ILS	↓ HVRtri; ↑ LF/HF

(continuação)

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Mansikka <i>et al.</i> (2016b)	Voo por instrumento, constituído de aproximações por instrumentos (ILS), realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F/A-18)	28 pilotos da Força Aérea da Finlândia	FC média, RR, SDNN, NN50, pNN50, RMSSD, HRVtri.	Comparação entre linha base e voo (alto desempenho)	↑ FC média, ↓ RR, ↓ SDNN, ↓ NN50, ↓ pNN50, ↓ HRVtri
				Comparação entre dois estados de desempenho (alta e abaixo do padrão)	↑ FC média, ↓ RR
				Comparação entre dois estados de desempenho (abaixo do padrão e baixo)	-
Mansikka; Virtanen; Harris (2019b)	Missão de combate, constituída de dois segmentos de ataque e dois segmentos de aproximação por instrumentos, realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F/A-18)	32 pilotos da Força Aérea da Finlândia	FC média e IBI	Comparação entre segmento de ataque e aproximação por instrumento	-
				Comparação entre segmentos de ataque (menor e maior dificuldade)	↓ FC média, ↑ IBI
				Comparação entre aproximações por instrumento (menor e maior dificuldade)	↓ IBI
Mansikka; Virtanen; Harris (2019a)	Voo por instrumento, constituído de aproximações por instrumentos (ILS), realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F/A-18)	27 pilotos da Força Aérea da Finlândia	IBI	Comparação entre linha base e voo	↓ IBI
				Comparação entre alto e médio desempenho	↓ IBI
				Comparação entre alto e baixo desempenho	↓ IBI
				Comparação entre médio e baixo desempenho	-
Kutilek <i>et al.</i> (2019)	Voo de treinamento constituído de 3 submissões, com diversas tarefas inesperadas (eventos estressantes)	2 pilotos da Força Aérea da República Tcheca	SD1, SD2	Comparação entre eventos estressantes e períodos de descanso	↓ SD1, ↓ SD2

(continuação)

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Villafaina <i>et al.</i> (2021)	Voo de treinamento constituído das fases de decolagem, ataque ar-ar, ataquar ar-solo e pouso, realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F-5M)	11 pilotos da Força Aérea da Espanha	FC média, RR, SDNN, pNN50, RMSSD, LF, HF, LF/HF, TOTpow, SD1, SD2	Comparação entre linha base e decolagem	↑ FC média, ↓ RR, ↓ LF, ↑ HF, ↓ LF/HF
				Comparação entre linha base e pouso	↑ FC média, ↓ RR
				Comparação entre decolagem e pouso	↑ FC média, ↓ RR, ↓ pNN50, ↓ RMSSD, ↓ SDNN
Santos <i>et al.</i> (2022)	Voo constituído de diversos procedimentos de emergência, realizado em simulador de voo de aeronave de instrução (TB-30)	4 pilotos da Força Aérea Portuguesa	FC média, SDNN, RMSSD, LF, HF, TOTpow, SD2, SI.	Comparação entre linha base e emergências (pilotos experientes)	△Mean HR, √RMSSD, √LF, √HF, √TOTpow, √SDNN
				Comparação entre linha base e emergências (pilotos novatos)	△Mean HR, √RMSSD, √HF, √TOTpow, √SDNN
Fernández-Morales <i>et al.</i> (2022)	Voo constituído de diversos procedimentos de emergência em três segmentos (decolagem, voo e pouso), realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F-5)	18 pilotos da Força Aérea da Espanha, sendo 7 instrutores e 11 alunos	Mean HR, FC min, FC max, pNN50, RMSSD, LF, HF, LF/HF, SD1, SD2, SS, S/SP	Comparação entre instrutores e alunos (decolagem, voo e pouso)	↑ Mean HR, ↑ Min HR
				Comparação entre decolagem e voo	↑ RMSSD, ↑ HF, ↑ LF, ↑ SD1, ↑ SD2, ↓ SS, ↓ S/SP
				Comparação entre voo e pouso	↑ Mean HR, ↑ Min HR, ↑ Max HR, ↓ pNN50, ↓ RMSSD, ↓ HF, ↓ LF, ↓ SD2, ↑ SS, ↑ S/SP
				Comparação entre decolagem e pouso	↑ Mean HR, ↑ Min HR, ↑ Max HR, ↑ RMSSD, ↑ SD1, ↑ SD2, ↓ SS, ↓ S/PS

(continuação)

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Li <i>et al.</i> (2022)	Voo constituído de cinco manobras de voo, com diferentes níveis de dificuldade, realizado em simulador de voo de aeronave de caça (F-35)	14 cadetes da Força Aérea	ECG, FC, SDSD, NN, SDNN, pNN50, pNN20, RMSSD, VLF, ULF, LF, HF, LF/HF	Correlação entre nível de dificuldade subjetivo das manobras realizadas e padrão fisiológico dos pilotos	-

VOR: radiofarol onidirecional em VHF; ILS: sistema de pouso por instrumento; FC média: frequência cardíaca média; RR/IBI: intervalo entre batimentos cardíacos; SDNN: desvio padrão de todos os intervalos RR normais; RMSSD: raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes; NN50: número de intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms; pNN50: porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms; HRVtri: índice triangular; LF: componente de baixa frequência; HF: componente de alta frequência; LF/HF: relação entre LF e HF; SD1: dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré; SD2: dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré; TOTpow: potência total; SI: índice de estresse; FC min: frequência cardíaca mínima; FC max: frequência cardíaca máxima; SS: pontuação de estresse; S/SP: razão simpática parassimpática; ECG: valor do eletrocardiograma; SDSD: desvio padrão da diferença entre intervalos NN adjacentes; NN: tempo entre intervalos RR normais; pNN20: número de intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 20ms dividido pelo número total de intervalos RR; VLF: componente de muito baixa frequência; ULF: componente de ultra baixa frequência; ↑ : aumento significativo ($p < 0,05$); ↓ redução significativa ($p < 0,05$); ∨: aumento (p não definido); √: redução (p não definido).

Fonte: o autor

Emergências com menor tempo para tomada de decisão, como durante decolagens, apresentaram aumento significativo na atividade simpática, bem como redução na atividade parassimpática, demonstrados por valores menores em 39% de pNN50, 25% de RMSSD, 49% de HF, 20% de SD1 e 16% de SD2 e valores 20% maiores de SS e 57% da razão S:OS, quando comparados com emergências durante o voo em rota. Na comparação entre emergências durante a decolagem e durante o pouso, a primeira manobra demonstrou maior atividade simpática e menor atividade parassimpática, com valores significativamente maiores de RMSSD (12%), SD1 (25%) e SD2 (9%) e menores de SS (9%) e razão S:PS (26%) durante o pouso (Fernández-Morales *et al.*, 2022).

Por outro lado, a comparação entre as manobras pouso e decolagem detectou maior atividade simpática no pouso, indicada por valores significativamente menores de intervalo RR (8%), pNN50 (62%), RMSSD (34%), SDNN (25%), SD1 (34%) e SD2 (23%) (Villafaina *et al.*, 2021).

Adicionalmente, um estudo buscou analisar diferentes índices da VFC e sua correlação com o nível de dificuldade da manobra de voo realizada, propondo um modelo para identificar a manobra de voo de acordo com o perfil fisiológico apresentado pelo piloto. Concluiu-se que os índices LF/HF ($r = -0,41$; $p = 0,25$), NN e ULF ($r = -0,55$; $p = 0,12$) apresentaram correlações não

significantes com o nível de dificuldade. Ainda assim, os três índices foram selecionados como indicadores chaves para o modelo proposto (Li *et al.*, 2022).

A análise da carga de trabalho também levou em consideração o desempenho dos pilotos em cinco estudos (Mansikka *et al.*, 2016a, 2016b; Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b, 2019a; Santos *et al.*, 2022). O primeiro estudo (Mansikka *et al.*, 2016a) analisou um voo constituído de seis fases com diferentes demandas: decolagem e subida, manobras, curvas niveladas, procedimento de emergência e aproximação monomotor, aproximação VOR (*very high frequency omnidirectional range*) e aproximação ILS (*instrument landing system*). Nessa pesquisa, os autores buscaram diferenciar as fases com dois parâmetros: desempenho, medido por meio de pontuação e carga de trabalho mental, verificada a partir dos índices da FC e VFC. Era esperado que as aproximações por instrumento (VOR e ILS) fossem as fases mais exigentes, enquanto a fase de manobras a menos exigente. Como resultado, destacou-se que os pilotos conseguiram manter um alto desempenho em todas as fases, sendo a pontuação de desempenho obtida capaz de diferenciar sete pares de segmentos entre si. Por sua vez, os índices da VFC também foram estatisticamente diferentes para os mesmos sete pares de segmento. Além desses, a VFC ainda foi capaz de diferenciar mais seis pares de segmentos, mesmo quando não houve variação de desempenho. Por exemplo: nas fases de curvas niveladas e aproximação VOR, os pilotos obtiveram desempenho estatisticamente equivalente. No entanto, os valores de intervalo RR e HR foram 4% menores e 4% maiores, respectivamente, durante o procedimento VOR. Nesse sentido, os autores concluíram que, mesmo quando o desempenho é mantido, pequenas variações de demanda da tarefa e, conseqüentemente, da carga de trabalho mental do piloto, podem ser identificadas por meio dos índices da VFC.

No intuito de verificar se, com o aumento contínuo da carga de trabalho, o piloto chegaria no limiar de ter o desempenho prejudicado, outros dois estudos manipularam a exigência das aproximações por instrumentos (Mansikka *et al.*, 2016b; Mansikka; Virtanen; Harris, 2019a). Mansikka *et al.* (2016b) utilizaram 12 aproximações ILS sucessivas, com diferentes níveis de exigência. Além do procedimento instrumento, os pilotos precisavam realizar tarefas complementares, como falar no rádio, mudar a frequência ou ajustar algum instrumento de voo. A exigência das aproximações era manipulada variando-se a distância do início das aproximações, ou seja, quanto menor a distância, menos tempo os pilotos possuíam para configurar a aeronave e realizar os procedimentos necessários para o início da aproximação. Nesse estudo, o desempenho dos pilotos foi avaliado e dividido em alto desempenho (missão base), desempenho abaixo do padrão (60% da missão base) e baixo desempenho (pior performance do piloto). A partir dos índices da VFC, os autores buscaram

diferenciar as três categorias e obtiveram diferenças estatísticas entre alto desempenho e desempenho abaixo do padrão, sendo intervalo RR 9% menor e HR 9% maior na categoria desempenho abaixo do padrão. Assim, os autores concluíram que, esses índices são sensíveis à pressão do tempo e, conseqüentemente, diferentes níveis de exigência.

Por sua vez, Mansikka, Virtanen e Harris (2019a) também utilizaram aproximações ILS manipuladas para possuírem diferentes exigências por meio da pressão temporal. Do mesmo modo, o desempenho foi dividido em três categorias: alto (melhor tentativa), médio (média das tentativas) e baixo desempenho (pior tentativa). Nesse caso, intervalo RR foi capaz de diferenciar as categorias de alto e médio desempenho, bem como alto e baixo desempenho, sendo 6% menor no médio desempenho e 7% menor no baixo desempenho. Corroborando com a pesquisa anterior, concluíram que intervalo RR é capaz de identificar diferentes níveis de desempenho.

Um quarto estudo demonstrou a importância de levar em consideração a consciência situacional do piloto na avaliação da carga de trabalho mental e da performance, em ambientes complexos (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b). Esse estudo identificou que, para tarefas de combate aéreo, o aumento na demanda das tarefas não gerou aumento da carga de trabalho mental do piloto, medida por meio do intervalo RR. Ao contrário, os segmentos de maior exigência apresentaram menor desempenho (21%) e valores 5% maiores de intervalo RR, indicando menor carga de trabalho mental. Esse fato é justificado pelos autores pela redução da consciência situacional dos pilotos, analisadas a partir de respostas testáveis, as quais reduziram em 71% no segmento de maior demanda (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b).

Também com o intuito de verificar o efeito da carga de trabalho mental no desempenho do piloto, um estudo foi conduzido para comparar três diferentes métodos de medição da carga de trabalho mental. Esses métodos incluíram dois questionários subjetivos, o NASA-TLX e a escala de Cooper-Harper, juntamente com uma medida fisiológica, baseada no intervalo entre batimentos cardíacos. Os resultados do estudo indicaram que os três métodos são sensíveis às manipulações de demandas das tarefas de voo, entretanto não foi encontrada correlação significativa entre os questionários subjetivos e o índice fisiológico analisado (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019a).

Por fim, duas pesquisas (Fernández-Morales *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022) buscaram analisar o efeito de diferentes níveis de experiência do piloto na resposta autonômica. O primeiro estudo (Fernández-Morales *et al.*, 2022) comparou a VFC de instrutores e alunos realizando treinamento de emergências, entretanto não obteve diferença significativa em nenhum dos parâmetros da VFC analisados: pNN50, RMSSD, HF, LF, LF/HF, SD1, SD2, SS

e razão S/PS. A segunda pesquisa (Santos *et al.*, 2022) analisou dois pilotos experientes, com mais de dez anos de serviço na base aérea, e dois pilotos com menos de dez anos de experiência. Com exceção da primeira emergência realizada, os pilotos experientes apresentaram maior resposta simpática, indicada por valores menores de RMSSD e SDNN. A emergência “falha do alternador”, por exemplo, produziu valores menores de RMSSD (47%) e SDNN (48%) em pilotos experientes. Ressalta-se, no entanto, que esse último estudo apresentou apenas os valores brutos dos índices da VFC, sem análise estatística inferencial.

5.3 Voo real versus voo simulado

Três estudos (Fuentes-García *et al.*, 2021; Johannes *et al.*, 2017; Magnusson, 2002) buscaram comparar a resposta autonômica em voos reais e simulados, utilizando o mesmo perfil de voo nas duas situações. Essas pesquisas verificaram se os dois tipos de voo produziram respostas fisiológicas similares, buscando compreender a fidelidade dos simuladores de voo em condições de treinamento. Os resultados estão sintetizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Alterações autonômicas no voo real versus simulado

Referência	Perfil do voo	População	Índices analisados	Tipo de análise	Alterações autonômicas
Magnusson (2002)	Missão de ataque (lançamento de bomba), realizada em aeronave de caça (JA-37)	5 pilotos de caça da Força Aérea da Suécia	FC média, LF (faixa 0,07 a 0,14Hz)	Comparação entre voo real e simulado	↓ FC média, ↑ LF
				Comparação entre a primeira e a última tentativa	↓ FC média, ↑ LF
Johannes <i>et al.</i> (2017)	Reabastecimento em voo, realizado em avião de AWACS (E-3) e em simulador	15 pilotos da Força Aérea da Alemanha	HPD, RMSSD	Comparação entre linha base e voo (voo real)	↓ HPD
				Comparação entre linha base e voo (voo simulado)	↓ HPD
				Comparação entre voo real e simulado	-
Fuentes-García <i>et al.</i> (2021)	Voo de combate realizado em avião de caça (F-5) e em simulador	12 pilotos da Força Aérea da Espanha	FC média, RR, SDNN, pNN50, RMSSD, LF, HF, LF/HF, TOT _{pow} , SD1, SD2.	Comparação entre voo real e simulado	↓ FC média, ↑ RR

FC média: frequência cardíaca média; LF: componente de baixa frequência; HPD/RR: intervalo entre batimentos cardíacos; RMSSD: raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes; SDNN: desvio padrão de todos os intervalos RR normais; pNN50: porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms; HF: componente de alta frequência; LF/HF: relação entre LF e HF; TOT_{pow}: potência total; SD1: dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré; SD2: dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré; ↑ : aumento significativo ($p < 0,05$); ↓ redução significativa ($p < 0,05$).

Fonte: o autor

A pesquisa conduzida por Johannes *et al.* (2017) identificou resposta autonômica similar em voos reais e simulados. Não foram identificadas diferenças significativas no intervalo RR e no RMSSD entre os dois tipos de voo. Quando os índices da VFC foram comparados à linha-base, constatou-se redução significativa no intervalo RR durante ambos os voos, porém não houve mudança significativa no índice RMSSD.

Por sua vez, Magnusson (2002) estabeleceu uma análise de regressão que explicasse os valores de FC e VFC do voo real em função dos valores de FC e VFC do voo simulado, da carga G e do número de tentativas. Nesse sentido, foi identificada diferença significativa nos valores de HR e LF (a constante da regressão), porém o padrão de resposta fisiológica manteve-se similar em ambos os casos. Ou seja, em ambos os perfis de voo a VFC diminuiu e a FC aumentou quando comparados à linha-base, porém no voo real foram identificados valores menores de VFC e maiores de FC do que no voo simulado.

Por fim, Fuentes-García *et al.* (2021) observaram que houve alteração na modulação autonômica apenas no voo real, indicada por valores de intervalo RR 25% menores durante o voo real quando comparado ao voo simulado. Em relação ao voo simulado, não houve diferença significativa em relação à linha-base.

5.4 Índices da variabilidade da frequência cardíaca

O Quadro 5 apresenta o efeito da atividade aérea (real e simulada) em cada índice da VFC. Para determinar se a variável aumentava ou reduzia, adotou-se 5% como nível de significância, quando comparado o momento sem atividade aérea (pré-voo ou linha-base) e o voo.

Quadro 5 - Efeito da atividade aérea na modulação autonômica

Índice	Alteração autonômica	Referências
FC	Aumento	Oliveira-Silva; Boullosa (2015); Mansikka <i>et al.</i> (2016a); Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez (2019); Mendes <i>et al.</i> (2021); Villafaina <i>et al.</i> (2021)
RR	Redução	Mansikka <i>et al.</i> (2016a); Mansikka; Virtanen; Harris (2019a); Johannes <i>et al.</i> (2017); Mendes <i>et al.</i> (2021); Villafaina <i>et al.</i> (2021)
SDNN	Redução	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Mansikka <i>et al.</i> (2016a); Mendes <i>et al.</i> (2021)
	Aumento	Oliveira-Silva; Boullosa (2015)
RMSSD	Redução	Oliveira-Silva; Boullosa (2015); Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez (2020); Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez (2021); Mendes <i>et al.</i> (2021)
pNN50	Redução	Mansikka <i>et al.</i> (2016a); Vicente-Rodríguez; Clemente-Suárez (2021)
HRVtri	Redução	Mansikka <i>et al.</i> (2016a)

(continuação)

Índice	Alteração autonômica	Referências
LF	Aumento	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Mendes <i>et al.</i> (2021)
	Redução	Villafaina <i>et al.</i> (2021)
HF	Redução	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Mendes <i>et al.</i> (2021)
	Aumento	Villafaina <i>et al.</i> (2021)
LF/HF	Aumento	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Skibniewski <i>et al.</i> (2015); Mendes <i>et al.</i> (2021); Villafaina <i>et al.</i> (2021)
	Redução	Villafaina <i>et al.</i> (2021)
TOTpow	Redução	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Mendes <i>et al.</i> (2021)
SD1	Redução	Sauvet <i>et al.</i> (2009); Oliveira-Silva; Boullosa (2015); Vicente-Rodriguez; Clemente-Suárez (2021)
SD2	Redução	Sauvet <i>et al.</i> (2009)

FC: frequência cardíaca; RR: intervalo entre batimentos cardíacos; SDNN: desvio padrão de todos os intervalos RR normais; RMSSD: raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre intervalos RR normais adjacentes; pNN50: porcentagem dos intervalos RR adjacentes com diferença de duração maior que 50ms; HRVtri: índice triangular; LF: componente de baixa frequência; HF: componente de alta frequência; LF/HF: relação entre LF e HF; TOTpow: potência total; SD1: dispersão dos pontos perpendiculares à linha de identidade do plot de Poincaré; SD2: dispersão dos pontos ao longo da linha de identidade do plot Poincaré.

Fonte: o autor

Durante os voos reais, os índices da VFC mais sensíveis para identificar variações na carga de trabalho dos pilotos entre o momento pré-voos e a atividade aérea foram RMSSD (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020b; Mendes *et al.*, 2021; Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Vicente-Rodriguez; Clemente-Suárez, 2021) – 4 estudos; SDNN (Mendes *et al.*, 2021; Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009) – 3 estudos; LF/HF (Mendes *et al.*, 2021; Sauvet *et al.*, 2009; Skibniewski *et al.*, 2015) – 3 estudos; e SD1 (Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009; Vicente-Rodriguez; Clemente-Suárez, 2021) – 3 estudos.

Por sua vez, os índices intervalo RR, SDNN, SD1 e SD2 demonstraram-se sensíveis na comparação entre segmentos do voo simulado com diferentes níveis de dificuldade, tendo esses índices apresentado diferenças significativas em 5 (Mansikka *et al.*, 2016a, 2016b; Mansikka; Virtanen; Harris, 2019b, 2019a; Villafaina *et al.*, 2021), 3 (Mansikka *et al.*, 2016a, 2016b; Villafaina *et al.*, 2021), 3 (Fernández-Morales *et al.*, 2022; Kutilek *et al.*, 2019; Villafaina *et al.*, 2021) e 3 (Fernández-Morales *et al.*, 2022; Kutilek *et al.*, 2019; Villafaina *et al.*, 2021) pesquisas, respectivamente.

6 DISCUSSÃO

O objetivo dessa revisão de escopo foi identificar as alterações na modulação autonômica de pilotos militares, visando compreender sua carga de trabalho durante a atividade aérea. Em relação aos voos reais, a atividade aérea produziu elevada resposta fisiológica nos pilotos, indicada pela redução da maior parte dos índices da VFC durante o voo. Essa redução está relacionada ao aumento da modulação simpática, que é a resposta do sistema nervoso autônomo a situações de estresse (Acharya *et al.*, 2006). De forma geral, uma elevada carga de trabalho mental leva à diminuição dos índices do domínio do tempo e da frequência, o que supõe redução da atividade parassimpática ou predomínio da atividade simpática (Delliaux *et al.*, 2019).

Apesar de dois estudos (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a; Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019) não reportarem alterações nos índices da VFC durante a atividade aérea, quando comparados a valores anteriores à decolagem, os autores apontaram para elevada resposta psicofisiológica em ambos os casos. Hormeño-Holgado e Clemente-Suárez (2019) justificam a ausência de alteração pelos baixos valores de RMSSD, pNN50 e LF observados em momento pré-voo, denotando resposta de ansiedade antecipatória elevada, a qual permaneceu estável durante a realização das manobras de combate em avião de caça. Nesse mesmo sentido, Bustamante-Sánchez e Clemente-Suárez (2020a), ao investigarem um voo de helicóptero, ressaltaram o elevado nível de estresse que acomete as tripulações durante o voo em período noturno. A redução do campo visual e conseqüente diminuição do senso de orientação aumenta a demanda do voo, elevando a resposta psicofisiológica da tripulação mesmo antes da decolagem, indicada pelos valores reduzidos de RMSSD.

Em relação aos voos simulados, um estudo (Fuentes-García *et al.*, 2021) não identificou alterações autonômicas durante o uso do simulador de voo, ao passo que todos os demais apontaram tal alteração. Os autores apontaram como possível justificativa para a divergência a população ser constituída de pilotos experientes, podendo haver uma resposta adaptativa ao ambiente estressor. Essa premissa, no entanto, não encontra consenso na literatura. Fernández-Morales *et al.* (2022) realizaram uma comparação da modulação autonômica de instrutores de voo e alunos, durante a realização de procedimentos de emergência em simulador de voo, entretanto não encontraram diferenças significativas entre os grupos. Similarmente, Santos *et al.* (2022) tentaram identificar diferenças na modulação autonômica de pilotos experientes e novatos, porém identificaram apenas diferença de performance entre os dois subgrupos, mantendo resposta fisiológica similar. Isso pode ser explicado pelo fato de que, quando submetidos a altas demandas, os operadores investem mais esforço para manter o desempenho

(Veltman; Gaillard, 1996a), o que será refletido pelos indicadores psicofisiológicos. No entanto, o indivíduo só é capaz de aumentar o esforço até certo limite, momento em que ocorre queda no desempenho devido ao excesso de carga de trabalho. Assim, essa diminuição de performance observada em pilotos menos experientes pode estar relacionada à redução do nível de percepção ou esforço desses pilotos, o que constitui o fator subjetivo da carga de trabalho (Hart; Staveland, 1988).

Nesse contexto, Mansikka, Virtanen e Harris (2019b) buscaram analisar de que forma a consciência situacional dos pilotos influencia o desempenho e a carga de trabalho. A suposição tradicional afirma que quando a demanda da tarefa aumenta, os pilotos investem mais esforço para manter o desempenho. Entretanto, os autores apontam que o nível de esforço despendido depende da consciência situacional, ou seja, do conhecimento do cenário tático e das informações críticas. Desse modo, em um cenário de elevada complexibilidade, o aumento da demanda gerou baixa carga de trabalho mental e baixa performance, justificado pela baixa consciência situacional dos pilotos dos objetivos táticos da missão.

Nessa mesma premissa, os mesmos autores em uma segunda pesquisa apontaram que o intervalo entre batimentos cardíacos não foi capaz de diferenciar média e baixa performance (Mansikka; Virtanen; Harris, 2019a), reforçando a suposição de que, ao aumentar a demanda da tarefa a um nível acima da capacidade do operador, este para de investir esforço para consecução da tarefa, resultando em estagnação da carga de trabalho mental. Nesse estudo, a carga de trabalho mental foi investigada também por meio da utilização do NASA-TLX. O componente “esforço” do questionário reforçou a hipótese apontada pela variabilidade da frequência cardíaca, mantendo-se constante entre baixa e média performance.

Embora seja um método subjetivo e esteja sujeito às percepções do indivíduo, a utilização do NASA-TLX, em conjunto com outros métodos objetivos, como a VFC, pode permitir ampliar a compreensão da carga de trabalho do operador em ambientes complexos. Nesse sentido, Mendes *et al.* (2021) buscaram verificar o relacionamento entre as alterações na modulação autonômica de pilotos em voo de lançamento de paraquedistas com os diferentes componentes do NASA-TLX, encontrando correlação com os componentes físico e mental da carga de trabalho percebida. Esse achado corrobora com a hipótese de Magnusson (2002), que afirma que as variáveis psicofisiológicas são influenciadas por três fontes principais: esforço mental, carga de trabalho físico e experiência.

Três estudos compararam voos reais e simulados com o objetivo de identificar respostas fisiológicas distintas em cada cenário. O pressuposto dessas pesquisas é baseado na possibilidade de ocorrência de reações psicofisiológicas adversas no indivíduo durante o voo

real, de modo que a VFC reflete as demandas físicas (carga G, vibração), psicológicas (estresse, responsabilidade, risco) e cognitivas (esforço mental), constituindo a carga de trabalho geral do piloto. No entanto, durante a simulação, não estão presentes os fatores físicos e psicológicos, restando apenas a demanda cognitiva. Nesse sentido, era esperado que a reação autonômica fosse menor no voo simulado, tendo em vista que as outras demandas não estariam presentes. Essa hipótese, porém, não pôde ser comprovada, tendo em vista que um estudo identificou a mesma exigência entre voos reais e simulados (Johannes *et al.*, 2017). Apesar disso, na comparação realizada por Fuentes-García *et al.* (2021), o voo real demonstrou maior exigência. Do mesmo modo, Magnusson (2002) identificou diferenças significativas de valores da VFC entre voos reais e simulados. O padrão de resposta fisiológica encontrada entre os dois tipos de voo, no entanto, foi similar, diferenciando-se apenas nas magnitudes encontradas, o que demonstra a validade na utilização de simuladores de voo para fins de treinamento.

Em relação ao tempo de recuperação do SNA, apesar de seis estudos (Bustamante-Sánchez; Clemente-Suárez, 2020a; Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez, 2019; Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009; Skibniewski *et al.*, 2015; Vicente-Rodriguez; Clemente-Suárez, 2021) analisarem os índices da VFC após o pouso, apenas duas pesquisas (Oliveira-Silva; Boullosa, 2015; Sauvet *et al.*, 2009) mantiveram o acompanhamento desses índices por tempo prolongado, realizando uma comparação do dia do voo com um dia controle. O restabelecimento dos valores da VFC não foi igual nos dois estudos, possivelmente por se tratar de voos com perfis e duração distintos e diferentes níveis de experiência dos pilotos. No entanto, ambos os voos provocaram reações no SNA que se estenderam por horas após o pouso, apontando para a relevância desse tipo de análise no planejamento de intervalo entre voos consecutivos, além de possibilitar a verificação do estado do piloto no momento anterior ao voo.

Por fim, em relação às alterações autonômicas, nota-se o predomínio da atividade simpática durante o voo. Isso porque a redução nos índices RMSSD, pNN50, HF e SD1 estão relacionados à retirada vagal, enquanto o aumento de LF relaciona-se ao predomínio da atividade simpática. Quando o organismo sofre um estímulo externo, a resposta parassimpática é mais rápida. No entanto, com a continuidade do estímulo e aumento da demanda, nota-se o predomínio simpático (Marães, 2010). Nesse sentido, a análise da VFC utilizando os domínios do tempo, frequência e métodos não lineares, em conjunto, parecem melhor indicar a presença de estímulos estressores.

6.1 Limitações

Essa revisão possui algumas limitações. Primeiramente, nota-se elevada heterogeneidade, principalmente metodológica. Apesar da pergunta delimitadora da pesquisa ter selecionado amostra de pilotos militares, existe uma gama variada de perfis de voos que podem ser realizados, aeronaves de diferentes performances e missões com diferentes objetivos e riscos, contribuindo para a diferença dos resultados. Por conseguinte, apesar de dificultar a generalização de resultados, essa revisão conseguiu abranger uma grande quantidade de perfis de voo e aeronaves, evidenciando as diferenças entre eles e demonstrando a necessidade do estudo específico para cada população analisada.

Em segundo lugar, em virtude do cenário dinâmico do ambiente operacional, nota-se reduzido número de participantes dos estudos incluídos, tornando limitada a generalização das contribuições.

7 CONCLUSÃO

Ao investigar os diferentes estudos que utilizaram a VFC em voo como método para acessar a modulação autonômica do piloto, conclui-se que a atividade aérea produziu aumento da atividade simpática durante o voo. Em alguns casos, houve redução dos índices da VFC em momento anterior ao voo, indicando um efeito antecipatório devido às altas demandas provocadas pela atividade aérea.

A análise dos diferentes domínios da VFC (tempo, frequência e não-linear), utilizados em conjunto, permitiu acessar a carga de trabalho do piloto nas diferentes fases de voo, demonstrando-se sensível para quantificar diferentes exigências. Durante os voos reais, os índices mais sensíveis para identificar variações na carga de trabalho do piloto foram RMSSD, SDNN, LF/HF e SD1. Por sua vez, durante os voos simulados, o intervalo RR, SDNN, SD1 e SD2 foram os índices mais sensíveis para comparar segmentos com diferentes níveis de dificuldade.

Além disso, observou-se que após o término da atividade aérea, o SNA não retorna aos valores iniciais imediatamente. O tempo de recuperação depende do tipo, duração e exigência do voo, devendo ser considerado a fim de programar o descanso entre voos consecutivos.

Espera-se que essa revisão possa contribuir com pesquisas futuras no desenvolvimento de estratégias para evitar que o piloto atinja a sobrecarga de trabalho, evitando a queda de desempenho durante o voo. Estudos futuros podem focar em verificar como a modulação autonômica é influenciada pelo voo durante o processo de aprendizagem do piloto, buscando identificar o comportamento dos índices da VFC. Pode-se verificar se é possível identificar o momento em que o aluno atinge a sobrecarga, acarretando em queda de desempenho (momento esse que seria necessário uma intervenção do instrutor). Além disso, pode-se verificar se, com a evolução dos voos, há redução da carga de trabalho devido à experiência adquirida.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, U. R. *et al.* Heart rate variability: a review. **Medical and Biological Engineering and Computing**, Germany, v. 44, n. 12, p. 1031–1051, 2006.
- ALAIMO, A. *et al.* Human Heart-Related Indexes Behavior Study for Aircraft Pilots Allowable Workload Level Assessment. **IEEE Access**, United States, v. 10, p. 16088–16100, 2022.
- BOURDON, P. C. *et al.* Monitoring Athlete Training Loads: Consensus statement. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, United States, v. 12, p. S2-161-S2-170, 2017.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Ensino. Portaria DIRENS nº 208/DCR, de 21 de fevereiro de 2022. Aprova as Instruções Específicas para o Exame de Admissão ao Curso de Formação de Oficiais Aviadores do ano de 2023 (IE/EA CFOAV 2023). **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 43, f. 2917, 4 mar. 2022a.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Portaria nº 1.597/GC3, de 10 de outubro de 2018. Aprova a reedição da DCA 11-45 “Concepção Estratégica - Força Aérea 100”. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 180, f. 11265, 15 out. 2018.
- BRASIL. Constituição (1998). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 05 de outubro de 1988. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 1 jul. 2023.
- BRASIL. Força Aérea Brasileira. CENIPA. **Painel SIPAER**, c2023a. Segmentos da aviação. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br/>. Acesso em: 18 fev. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: asas que protegem o país, 2021. Aeronaves. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/aeronave>. Acesso em: 4 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: asas que protegem o país. Asas Rotativas, 2017. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/asasrotativas>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: asas que protegem o país, 2020. Listagem de unidades da FAB. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/organizacoes/categoria>. Acesso em: 1 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. Aviações mais operacionais. **NOTAER**: O jornal da Força Aérea Brasileira, Brasília, DF, a. XLVI, n. 10, p. 6, out. 2022b. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/publicacao/listagemNotaer>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. Dia da aviação de caça. **NOTAER**: O jornal da Força Aérea Brasileira, Brasília, DF, a. XLVI, n. 4, p. 4 – 5, abr. 2022c. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/publicacao/listagemNotaer>. Acesso em: 2 jul. 2023.

- BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. Dia da aviação de patrulha. **NOTAER**: O jornal da Força Aérea Brasileira, Brasília, DF, a. XLVII, n. 5, p. 4-5, maio 2023b. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/publicacao/listagemNotaer>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. Dia da aviação de reconhecimento. **NOTAER**: O jornal da Força Aérea Brasileira, Brasília, DF, a. XLVI, n. 6, p. 6 – 7, jun. 2022d. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/publicacao/listagemNotaer>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei Complementar nº 97, de 9 de junho de 1999. Dispõe sobre as normas gerais para a organização, o preparo e o emprego das Forças Armadas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp97.htm. Acesso em: 1 jul. 2023.
- BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, Á. *et al.* Psychophysiological response of fighter aircraft pilots in normobaric hypoxia training. **Archivos de Medicina del Deporte**, Spain, v. 35, n. 2, p. 99–102, 2018.
- BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, Á. *et al.* Effect of Stress on Autonomic and Cardiovascular Systems in Military Population: A Systematic Review. **Cardiology Research and Practice**, United Kingdom, v. 2020, p. 1–9, 2020.
- BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, Á.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Psychophysiological Response to Disorientation Training in Different Aircraft Pilots. **Applied Psychophysiology Biofeedback**, United States, v. 45, n. 4, p. 241–247, 2020a.
- BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, Á.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Psychophysiological response in night and instrument helicopter flights. **Ergonomics**, London, UK, v. 63, n. 4, p. 399–406, 2020b.
- CASNER, S. M.; GORE, B. F. Measuring and Evaluating Workload: A Primer. **NASA Technical Memorandum**, v. 216395, p. 2010, 2010
- CHIALASTRI, A. Automation in Aviation. *In*: **Automation**. Rome: INTECH Open Access Publisher, 2012. p. 79–102.
- CLEMENTE-SUÁREZ, V. J.; ROBLES-PÉREZ, J. J.; FERNÁNDEZ-LUCAS, J. Psychophysiological response in an automatic parachute jump. **Journal of Sports Sciences**, United Kingdom, v. 35, n. 19, p. 1872–1878, 2017.
- DELGADO-MORENO, R. *et al.* Effect of experience and psychophysiological modification by combat stress in soldier's memory. **Journal of Medical Systems**, Dordrecht, Netherlands, v. 43, n. 6, p. 1–8, 2019.
- DELLIAUX, S. *et al.* Mental Workload Alters Heart Rate Variability, Lowering Non-linear Dynamics. **Frontiers in physiology**, Switzerland, v. 10, p. 565, 2019.

ELIAS, J. Saiba como é a formação do aviador da Força Aérea Brasileira. **Força Aérea Brasileira**: asas que protegem o país, 2017. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/31128/>. Acesso em: 1 jul. 2023.

FERNÁNDEZ-MORALES, C. *et al.* Analysis of heart rate variability during emergency flight simulator missions in fighter pilots. **BMJ Military Health**, United Kingdom, v. 0, p. 1–7, 2022.

FUENTES-GARCÍA, J. P. *et al.* Impact of Real and Simulated Flights on Psychophysiological Response of Military Pilots. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 787–795, 2021.

GOURAUD, J.; DELORME, A.; BERBERIAN, B. Autopilot, Mind Wandering, and the Out of the Loop Performance Problem. **Frontiers in Neuroscience**, Switzerland v. 11, n. 541, p. 1–13, 2017.

HART, S. G. NASA-TASK LOAD INDEX (NASA-TLX); 20 YEARS LATER. *In*: PROCEEDINGS OF THE HUMAN FACTOR AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING, 2006, Los Angeles. **Anais [...]**. Los Angeles: Sage publications, 2006, p. 904–908.

HART, S.; STAVELAND, L. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. **Advances in Psychology**, North-Holland, v. 52, p. 139–183, 1988.

HORMEÑO-HOLGADO, A. J.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Effect of different combat jet manoeuvres in the psychophysiological response of professional pilots. **Physiology & Behavior**, United States, v. 208, p. 112559–112563, 2019.

IMPELLIZZERI, F. M.; MARCORÀ, S. M.; COUTTS, A. J. Internal and External Training Load: 15 Years On. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, United States, v. 14, n. 2, p. 270–273, 2019.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches (Doc 9966)**, Montreal, 2016. ‘

JOHANNES, B. *et al.* Psychophysiological Assessment in Pilots Performing Challenging Simulated and Real Flight Maneuvers. **Aerospace Medicine and Human Performance**, United States, v. 88, n. 9, p. 834–840, 2017.

KUTILEK, P. *et al.* Heart Rate Variability During Fighter Pilot Training: Preliminary Study. Em: **2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)**. Brno: IEEE, 2019. p. 1–5.

LI, Y. *et al.* Pilot Behavior Recognition Based on Multi-Modality Fusion Technology Using Physiological Characteristics. **Biosensors**, Switzerland, v. 12, n. 6, p. 404, 2022.

LYSAGHT, R. J. *et al.* Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies (Tech. Rep. 851). **Fort Bliss, TX: US Army Research Institute, Field Unit**, 1989.

- MAGNUSSON, S. Similarities and Differences in Psychophysiological Reactions Between Simulated and Real Air-to-Ground Missions. **International Journal of Aviation Psychology**, United States, v. 12, n. 1, p. 49–61, 2002.
- MANSIKKA, H. *et al.* Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches. **Ergonomics**, London, UK, v. 59, n. 10, p. 1344–1352, 2016a.
- MANSIKKA, H. *et al.* Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during an instrument flight rules proficiency test. **Applied Ergonomics**, United Kingdom, v. 56, p. 213–219, 2016b.
- MANSIKKA, H.; VIRTANEN, K.; HARRIS, D. Dissociation between mental workload, performance, and task awareness in pilots of high performance aircraft. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, United States, v. 49, n. 1, p. 1–9, 2019a.
- MANSIKKA, H.; VIRTANEN, K.; HARRIS, D. Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper–Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks. **Ergonomics**, London, UK, v. 62, n. 2, p. 246–254, 2019b.
- MARÃES, V. R. F. S. Frequência cardíaca e sua variabilidade: análises e aplicações. **Revista Andaluza de Medicina del Deporte**, España, v. 3, n. 1, p. 33–42, 2010.
- MCCMAHON, T. W.; NEWMAN, D. G. The Differential Effect of Sustained Operations on Psychomotor Skills of Helicopter Pilots. **Aerospace Medicine and Human Performance**, United States, v. 89, n. 6, p. 496–502, 2018.
- MENDES, E. *et al.* Effects of Workload in Novice Military Transport Flights on Autonomic Modulation and Cognitive Performance: An Observational Cross-Sectional Study. **Revista de Educação Física / Journal of Physical Education**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 4, p. 282–298, 2021.
- O'DONNELL, C. R. D.; EGGEMEIER, F. T. Workload assessment methodology. *Em: BOFF, K.; KAUFMAN, L.; THOMAS, J. Handbook of Perception and Human Performance*. New York: Wiley-Interscience, 1986. v. 2, p. 1–49.
- OLIVEIRA-SILVA, I.; BOULLOSA, D. A. Physical Fitness and Dehydration Influences on the Cardiac Autonomic Control of Fighter Pilots. **Aerospace Medicine and Human Performance**, United States, v. 86, n. 10, p. 875–880, 2015.
- PETERS, M. D. J. *et al.* Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. **JBI Evidence Synthesis**, v. 18, n. 10, p. 2119–2126, 2020.
- PUMPRLA, J. *et al.* Functional assessment of heart rate variability: physiological basis and practical applications. **International Journal of Cardiology**, United States, v. 84, p. 1–14, 2002.
- REINHART, R. **Basic flight physiology**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

RIBAS, P. R.; RIBEIRO, L. C. S. Aptidão física e controle do comportamento psicofisiológico de pilotos de helicópteros do exército brasileiro pelo biofeedback. **Revista de Educação Física**, Rio de Janeiro, n. 127, p. 41–47, 2003.

ROCHA, R.; LIMA, F. Erros humanos em situações de urgência: análise cognitiva do comportamento dos pilotos na catástrofe do voo Air France 447. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 25, n. 3, p. 568–582, 2018.

ROSCOE, A. H. Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration? **Biological Psychology**, Netherlands, v. 34, n. 2–3, p. 259–287, 1992.

SANTOS, S. *et al.* The Effect of Expertise during Simulated Flight Emergencies on the Autonomic Response and Operative Performance in Military Pilots. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [*s. l.*], v. 19, n. 15, p. 9141–9150, 2022.

SAUVET, F. *et al.* Heart rate variability in novice pilots during and after a multi-leg cross-country flight. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, United States, v. 80, n. 10, p. 862–869, 2009.

SHAFFER, F.; GINSBERG, J. P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. **Frontiers in Public Health**, Switzerland, v. 5, n. 258, p. 1–17, 2017.

SKIBNIEWSKI, F. W. *et al.* Preliminary Results of the LF/HF ratio as an Indicator for Estimating Difficulty Level of Flight Tasks. **Aerospace Medicine and Human Performance**, United States, v. 86, n. 6, p. 518–523, 2015.

STEIN, P. K. *et al.* Heart rate variability: A measure of cardiac autonomic tone. **American heart journal**, United States, v. 127, n. 5, p. 1376–1381, 1994.

STEPHENSON, M. D. *et al.* Applying Heart Rate Variability to Monitor Health and Performance in Tactical Personnel: A Narrative Review. **International journal of environmental research and public health**, [*s. l.*], v. 18, n. 15, p. 8143–8162, 2021.

TRICCO, A. C. *et al.* PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. **Annals of Internal Medicine**, v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.

VANDERLEI, L. C. M. *et al.* Noções básicas de variabilidade da frequência cardíaca e sua aplicabilidade clínica. **Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 205–217, 2009.

VELTMAN, J. A. A Comparative Study of Psychophysiological Reactions During Simulator and Real Flight. **The International Journal of Aviation Psychology**, United States, v. 12, n. 1, p. 33–48, 2002.

VELTMAN, J. A.; GAILLARD, A. W. K. Physiological indices of workload in a simulated flight task. **Biological Psychology**, Netherlands, v. 42, n. 3, p. 323–342, 1996.

VICENTE-RODRIGUEZ, M.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Psychophysiological Anxiety Response of a Rescue Helicopter Crew in a Crane Rescue Manoeuvre. **BMJ Military Health**, United Kingdom, v. 167, n. 6, p. 413–417, 2021.

VILLAFAINA, S. *et al.* Psychophysiological response of military pilots in different combat flight maneuvers in a flight simulator. **Physiology & Behavior**, United States, v. 238, p. 113483–113489, 2021.

WINGELAAR-JAGT, Y. *et al.* Fatigue in Aviation: Safety Risks, Preventive Strategies and Pharmacological Interventions. **Frontiers in Physiology**, Switzerland, v. 12, n. 71268, p. 1–21, 2021.

APÊNDICE A – Estratégia de busca

Quadro 6 – Estratégia de busca

MEDLINE
Busca: título e resumo Filtros: últimos 20 anos
((“Heart rate”[Title/Abstract] OR “Heart rate control”[Title/Abstract] OR “Heart rate variability”[Title/Abstract] OR “HRV”[Title/Abstract] OR “Physiological”[Title/Abstract] OR “Psychophysiological”[Title/Abstract]) AND (“Pilots”[Title/Abstract] OR “Aviator”[Title/Abstract] OR “co pilot”[Title/Abstract] OR “co pilot”[Title/Abstract] OR “Aircraft”[Title/Abstract] OR “Airplane”[Title/Abstract] OR “Helicopter”[Title/Abstract] OR “Aviation”[Title/Abstract] OR “Flight”[Title/Abstract] OR “Crew”[Title/Abstract] OR “Flight simulator”[Title/Abstract]) AND (“military”[Title/Abstract] OR “military personnel”[Title/Abstract] OR “coast guard”[Title/Abstract] OR “air force personnel”[Title/Abstract] OR “armed forces personnel”[Title/Abstract] OR “soldier”[Title/Abstract]))
SCOPUS
Busca: título, resumo e palavras-chave Filtros: últimos 20 anos / excluir Medline/ artigos e artigos de revisão
TITLE-ABS-KEY (“Heart rate” OR “Heart rate control” OR “Heart rate variability” OR hrv OR physiological OR psychophysiological) AND TITLE-ABS-KEY (pilots OR aviator OR co-pilot OR “Co pilot” OR aircraft OR airplane OR helicopter OR aviation OR flight OR crew OR “Flight simulator”) AND TITLE-ABS-KEY (military OR “military personnel” OR “coast guard” OR “air force personnel” OR “armed forces personnel” OR “soldier”)
LILACS
Busca: título, resumo, assunto Filtros: últimos 20 anos
(“Heart rate”) OR (“Heart rate control”) OR (“Heart rate variability”) OR (HRV) OR (Physiological) OR (Psychophysiological) AND ((military) OR (“military personnel”) OR (“coast guard”) OR (“air force personnel”) OR (“armed forces personnel”) OR (“soldier”)) AND ((Pilots) OR (Aviator) OR (Co-pilot) OR (“Co pilot”) OR (Aircraft) OR (Airplane) OR (Helicopter) OR (Aviation) OR (Flight) OR (Crew) OR (“Flight simulator”))

Fonte: o autor