

A VARIABILIDADE DA FREQUÊNCIA CARDÍACA PODE SER UM INDICADOR CONFIÁVEL DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE PILOTOS DE CAÇA?

Gilberto Pivetta Pires¹

Edson Koury do Nascimento²

RESUMO

O avanço da tecnologia aeroespacial exige uma abordagem integrada entre humanos e máquinas. Especialistas em medicina aeroespacial enfrentam o desafio de avaliar o desempenho dos pilotos considerando a complexa interação entre ambos. Este estudo revisa a relação entre a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) e o desempenho operacional em pilotos de caça. A exposição regular a altas acelerações de Força +Gz é uma realidade para poucas centenas de pilotos, principalmente militares. Embora estudos em ratos indiquem lesões cardíacas devido a altas acelerações, não foram encontradas associações claras em humanos. A exposição repetida pode afetar o metabolismo oxidativo do tecido do miocárdio. Equipamentos como a centrífuga humana são essenciais para entender a resposta do corpo à força G durante manobras aéreas, mas seu alto custo limita sua utilização. Investir em pesquisas adicionais pode aprimorar a compreensão dos efeitos da exposição crônica à aceleração +Gz e buscar alternativas acessíveis para avaliação e treinamento dos pilotos.

Palavras-chave: Aviação militar; Pilotos; Sistema nervoso autônomo; Variabilidade da frequência cardíaca.

¹ Prof. Dr. com Licenciatura Plena em Educação Física pela Escola Superior de Educação Física e Desportos de Catanduva- ESEFIC (1997), Especialização em Atividades Aquáticas pela Universidade Norte do Paraná - UNOPAR (2000), Mestrado em Educação Física pela Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP (2005), e Doutorado em Educação Física pela Universidade São Judas Tadeu - USJT (2014). Atualmente é docente permanente do

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 3, p. 34-54, jun/jul. 2025.

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu (Mestrado Profissional) em Desempenho Humano Operacional - PPGDHO na Universidade da Força Aérea - UNIFA. E-mail: gilbertopivettapires@gmail.com

² Cap QOAVKOURY concluiu o CFOAV em 2011 e possui graduação em Ciências Aeronáuticas e Administração com ênfase em Administração Pública pela Academia da Força Aérea, possui especialização em Gestão Pública pela Universidade Anhanguera (2016) e Mestrado em Desempenho Humano Operacional, modalidade profissional, pela Universidade da Força Aérea- UNIFA (2024). Atualmente é Chefe da Sub coordenadoria de Governança do Primeiro Comando Aéreo Regional (I COMAR). UNIFA. E-mail: koury.fab@gmail.com

CAN HEART RATE VARIABILITY BE A RELIABLE INDICATOR OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF FIGHTER PILOTS?

ABSTRACT

The advancement of aerospace technology requires an integrated approach between humans and machines. Aerospace medicine experts face the challenge of assessing pilot performance considering the complex interaction between both. This study reviews the relationship between heart rate variability (HRV) and operational performance in fighter pilots. Regular exposure to high +Gz acceleration forces is a reality for a few hundred pilots, primarily military. While studies in mice suggest cardiac injuries due to high accelerations, clear associations in humans have not been found. Repeated exposure may affect oxidative metabolism in myocardial tissue. Equipment such as the human centrifuge is essential for understanding the body's response to G-forces during aerial maneuvers, but its high cost limits its use. Further research investment could enhance understanding of the effects of chronic +Gz acceleration exposure and explore affordable alternatives for pilot assessment and training.

Keywords: *Military aviation; Pilots; Autonomic nervous system; Heart rate variability.*



1 INTRODUÇÃO

A Força Aérea Brasileira (FAB) tem como uma de suas concepções estratégicas o domínio de tecnologias que otimizem os processos de trabalho e introduzam novos conceitos operacionais (Brasil, 2018). Essa abordagem é fundamental para manter o “Poder Aéreo” de uma nação, exigindo a contínua aquisição de equipamentos de última geração para garantir a soberania do espaço aéreo (Rangel *et al.*, 2020). Em consonância com a Estratégia Nacional de Defesa (END), a FAB investiu na aquisição das aeronaves de caça F-39 Gripen-NG, consideradas uma das mais modernas da atualidade (Brasil, 2018, 2020, 2021). A incorporação dessa nova tecnologia avançada e de amplo espectro implica na necessidade de aprimorar a formação dos pilotos, capacitando-os para lidar com esse cenário tecnológico (Brasil, 2021).

O avanço da tecnologia aeroespacial requer uma abordagem integrada entre o humano e a máquina. Especialistas em medicina aeroespacial enfrentam o desafio de desenvolver processos dinâmicos de avaliação do desempenho dos pilotos, considerando a interação complexa entre ambos (Steinkraus *et al.*, 2012). Metodologias práticas devem avaliar as funções fisiológicas da tripulação de forma dinâmica, abrangendo desde o pré-voo (seleção e retenção) até o pós-voo (avaliação de efeitos fisiológicos crônicos) (Russo; Stetz; Thomas, 2005; Thomas; Russo, 2007). No entanto, o fator humano continua sendo uma causa relevante de acidentes aeronáuticos em todo o mundo. Pilotos militares enfrentam cargas estressoras extremas, e a falta de percepção dos sintomas físicos pode levar à falência física (Carpenter; Allum e Honegger, 2001; Brasil, 2016). As altas forças Gz durante manobras acrobáticas podem reduzir a capacidade operacional e ameaçar a segurança do voo devido à perda de consciência induzida por Gz (G-LOC) (Hargens; Bhattacharya; Schneider, 2013).

A análise da VFC ganha destaque como instrumento para avaliar adaptações ao ambiente aeroespacial. A VFC é capaz de identificar alterações

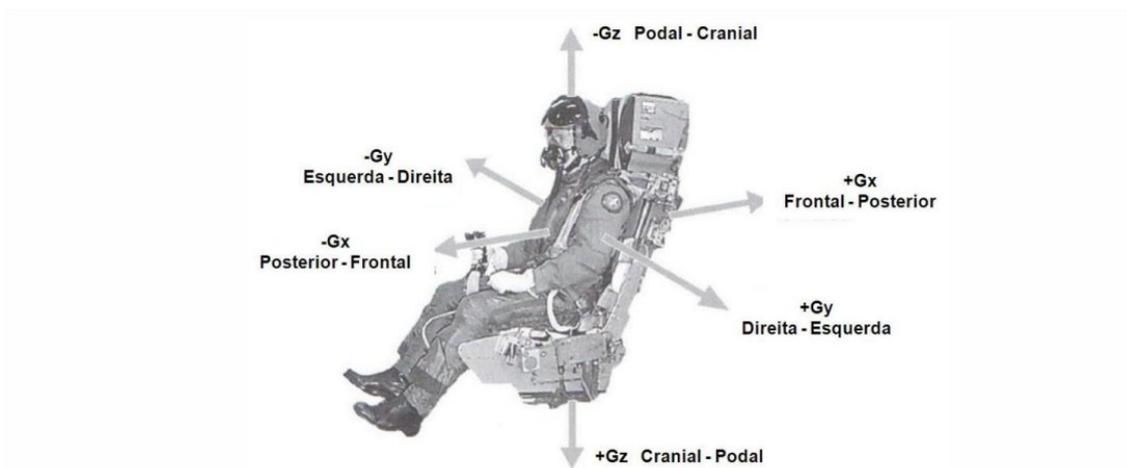
cardiovasculares por meio do Sistema Nervoso Autônomo (SNA), sendo reconhecida pela *European Society of Cardiology* e pela *North American Society of Pacing and Electrophysiology* (Newman e Callister, 2008; Hargens; Bhattacharya e Schneider, 2013; Sá, 2015). A VFC, fenômeno fisiológico que reflete as flutuações no intervalo entre os batimentos cardíacos, transcende a regularidade do ritmo cardíaco e revela informações cruciais sobre a saúde cardiovascular. Ela não é apenas uma métrica numérica, mas um elo entre a atividade autonômica e a adaptação do organismo a diferentes contextos. Além de ser sensível ao estresse físico e emocional em atletas, a VFC está intimamente ligada à regulação autonômica do coração, sendo um marcador precoce de disfunções cardiovasculares (Marães, 2010).

Portanto, nesse contexto da aviação de caça, a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) pode desempenhar um papel crucial. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo apresentar uma revisão narrativa sobre a relação entre a VFC e o desempenho operacional em pilotos de caça.

2 O AMBIENTE AEROESPACIAL

No ambiente aeroespacial, o piloto é exposto a grandes variações de pressão, temperatura, vibração, além da influência de forças acelerativas extremas. Segundo o princípio da equivalência de Albert Einstein (1879-1955), a força da gravidade é equivalente a um vetor de aceleração e na superfície da terra, esse valor é uma constante de $9,80\text{m/s}^2$, o que equivale a força de 1G. Na fisiologia aeroespacial, a aceleração é especificada em 3 eixos: Eixo X – sagital, Eixo Y – transversal e Eixo Z – longitudinal. O sentido da força G é padronizada como positiva no eixo X, quando segue do plano frontal para o posterior, no eixo Y, quando segue da direita para a esquerda e no eixo Z, quando segue o crânio para o podal, conforme a Figura 1 (Scott *et al.*, 2007; Gradwell e Rainford, 2016).

Figura 1 - Terminologia padrão para os eixos de aceleração G



Fonte: Adaptado de Gradwell e Rainford (2016 p. 134)

De forma a possibilitar um maior entendimento sobre as percepções de aceleração e direção em eixo, está descrita no Quadro 1 as sensações, conforme descrito por Banks *et al.* (2008) e adaptado por Silva (2016).

Quadro 1 – Percepção de aceleração nos eixos X, Y e Z

DIREÇÃO E EIXO	SENSAÇÃO
+ Gx	Quando se pisa no acelerador de um veículo e ele arranca rapidamente.
- Gx	Quando se pisa no freio, fazendo com que o veículo pare de maneira abrupta.
+ Gy	Quando a força vai exercer pressão sobre o braço esquerdo.
- Gy	Quando a força vai exercer pressão sobre o braço direito.
+ Gz	Quando se tem a sensação de estar sendo empurrado para baixo.
- Gz	Quando se tem a sensação de estar sendo lançado para cima.

Fonte: Silva, 2016.

Os efeitos da exposição a Força Gx são mais estudados para viagem espaciais, tendo em vista que para resistir os valores de aceleração do lançamento e da reentrada, que podem alcançar valores de +4 a +6 G's, adota-se a posição supina. Os astronautas apresentam uma maior tolerância a Força Gx suportando

+8G por seis minutos, sem auxílio de pressão positiva de oxigênio, podendo chegar a +14 a +15Gx por um período de até 150 segundos. Já os efeitos da Força Gy são poucos estudados em virtude de valores em voos acrobáticos de alta performance ficarem por volta de +/- 2Gy, com um período curto e apenas durante a execução de curvas com um grande ângulo de ataque, o que não implica em efeitos fisiológicos agudos (Gradwell e Rainford, 2016).

3 EFEITOS FISIOLÓGICOS AGUDOS A EXPOSIÇÃO À ACELERAÇÃO GZ

Durante o desafio ortostático simples de manutenção da ortostase (+1Gz), ocorre acúmulo significativo de volume sanguíneo nos membros inferiores após 3 a 5 minutos. Essa adaptação leva à diminuição da pressão diastólica e do volume sistólico, com estabilização em 20 a 30 minutos, mas ainda mantendo uma redução de cerca de 15% no volume de ejeção (Benditt *et al.*, 1996). A falta de ajustes compensatórios pode resultar em sintomas de intolerância ortostática ou até mesmo perda súbita de consciência (Elias Neto, 2006).

A exposição à aceleração gravitacional (G) provoca alterações na pressão arterial e redistribuição do fluxo sanguíneo, ativando reflexos que envolvem barorreceptores, receptores cardiopulmonares e quimiorreceptores arteriais. Além disso, os mecanorreceptores e metaborreceptores do músculo esquelético, bem como os receptores pulmonares e vestibulares, também são afetados pela aceleração G, modulando a função cardiovascular. Tanto os barorreceptores carotídeos quanto os cardiopulmonares desempenham um papel importante nos mecanismos compensatórios para manter a perfusão cerebral (Linnarsson *et al.*, 1996).

Com a queda da pressão arterial, o Sistema Nervoso Simpático (SNS) é ativado para evitar a diminuição da perfusão cerebral e do volume sistólico. O SNS aumenta a frequência cardíaca e promove vasoconstricção, enquanto o Sistema Nervoso Parassimpático (SNP) diminui a frequência cardíaca. (Martinelli, 1996). A

redução do volume sanguíneo central é compensada por um aumento reflexo da FC e da resistência periférica. Essas respostas, mediadas pelo Sistema Nervoso Autônomo (SNA), envolvem a atuação do SNS e do SNP (Hernandez, 2004; Montastruc, 1994).

A exposição à alta aceleração +Gz tem efeitos dramáticos no sistema cardiovascular dos pilotos de combate. Esses efeitos envolvem respostas neurocardiovasculares, incluindo reajustes barorreflexos, semelhantes às exigências autonômicas da ortostase, mas intensificadas. Embora o sistema cardiovascular esteja adaptado para manter a perfusão cerebral durante a postura ereta, a exposição à Força G no voo altera a pressão hidrostática no cérebro e nos membros inferiores, afetando a pressão arterial e o fluxo ventricular esquerdo (Elias Neto, 2006; Newman e Callister, 2008; Hinghofer-Szalkay, 2011).

Portanto, o estresse gravitacional ao qual os pilotos de combate estão expostos pode causar mudanças dramáticas no volume sanguíneo e na pressão arterial, às vezes resultando em falta de perfusão cerebral (Convertino, 1998; Scott *et al.*, 2007; Ozturk; Ilbasmis; Akin, 2012). Os efeitos das acelerações podem variar desde alterações visuais até arritmias cardíacas e perda de consciência. Além disso, as manobras de voo podem exigir grande esforço físico, com consumo de oxigênio elevado e frequência cardíaca próxima ao máximo, levando à fadiga muscular (Newman *et al.*, 1998; Guézennec *et al.*, 2001). Pensa-se que as manobras durante o voo podem demandar um esforço físico significativo, com consumo de oxigênio superior a 70% do VO₂máx e frequência cardíaca próxima ao limite máximo. Embora isso não seja suficiente para causar fadiga central, pode levar à fadiga periférica devido ao trabalho muscular excessivo (Guézennec *et al.*, 2001).

O estudo de Dussault *et al* (2002) investigou pilotos antes e após voos com manobras. Eles analisaram a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) e a pressão arterial de repouso durante testes ortostáticos após o voo. Os resultados revelaram uma perturbação contínua do equilíbrio orto-parassimpático,

possivelmente relacionada ao controle barorreflexo. Comparando a VFC e a variabilidade da pressão arterial antes e após o voo, observou-se um aumento do tônus simpático imediatamente após o voo e um aumento do tônus parassimpático 2 horas após o voo. Portanto, é crucial não apenas examinar os efeitos cardiovasculares da alta exposição gravitacional, mas também implementar medidas eficazes para aumentar a segurança dos pilotos (Scott *et al.*, 2007; Ozturk; Ilbasimis; Akin, 2012).

4 EFEITOS FISIOLÓGICOS CRÔNICOS A EXPOSIÇÃO DA FORÇA GZ

A quantidade de pilotos ao redor do mundo que são regularmente expostos a altas acelerações de Força +Gz é relativamente pequena, ficando restritos a poucas centenas, em sua maioria, pilotos militares. Embora haja pilotos civis que executem manobras acrobáticas, poucos são os que atingem altas cargas e suas aeronaves, de forma geral, não são capazes de sustentar altos valores de +Gz por períodos mais prolongados, o que limita a respostas fisiológicas agudas.

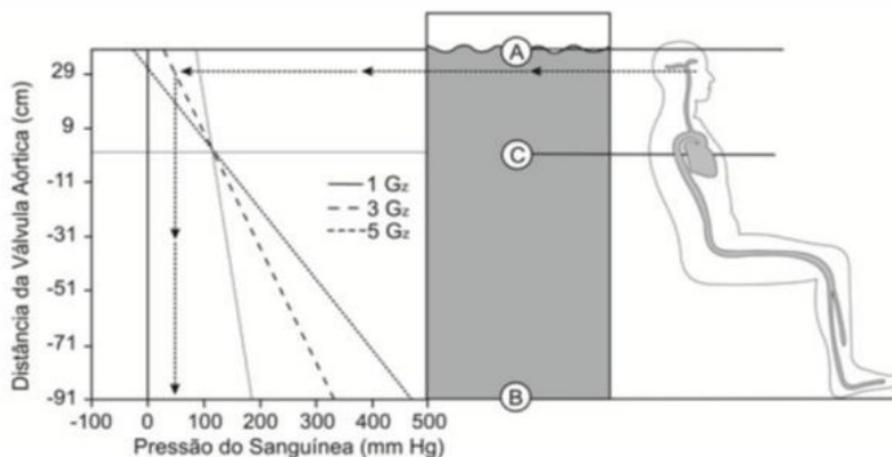
Na aviação militar, os valores de exposição às acelerações dependem do tipo e capacidade da aeronave operada, porém a maioria dos tripulantes são expostos a pelo menos +3Gz durante um longo período de treinamento de voo (Gradwell; Rainford, 2016).

A exposição a altas cargas +Gz provoca profundos efeitos no sistema cardiovascular, iniciando com sintomas visuais como o Gray-out, chegando à perda momentânea da visão, o *Black-out*, a depender da intensidade da aceleração, normalmente superior a +4,5Gz, a perda de consciência induzida pela força G (*G-induced loss of consciousness* – G-LOC).

Estes efeitos são provocados pela ação da força no sentido da cabeça para os pés (eixo positivo da força Gz), o que acarreta a redistribuição do sangue. Quanto maior a força +Gz, maior será a pressão arterial nos membros inferiores (Eiken; Mekjavic; Sundblad, 2012; Gradwell; Rainford, 2016; Silva, 2016). No sentido oposto,

em virtude da ação da variação de pressão hidrostática, a PA ao nível dos olhos de um adulto comum exposto à aceleração de +1Gz, é de aproximadamente 22mmHg menor do que a força encontrada na saída do coração. Considerando uma PA média de 110mmHg, quando o piloto for exposto a força de +5Gz, desconsiderando possíveis efeitos compensatórios, a pressão ao nível dos olhos pode chegar a 0mmHg, conforme ilustrado na Figura 2 (Gradwell; Rainford, 2016).

Figura 2 - Pressão Arterial de acordo com a Força Gz



Fonte: Adaptado de Davis et al., (2008, p. 88).

As altas forças acelerativas do voo acrobático impõem alterações extremas no funcionamento do sistema cardiovascular, provocando aumento no tamanho das artérias e veias e redução da resistência periférica. Essas mudanças afetam os barorreceptores arteriais elevando a vasoconstrição, visando o restabelecimento da homeostase e regulação da pressão periférica (Eiken; Mekjavic; Sundblad, 2012). Um dos efeitos consiste na redistribuição de volume sanguíneo para o meio intersticial e para os tecidos na região abaixo do coração, diminuindo o volume oncótico e retorno venoso (Davis et al., 2008).

Segundo Joyner e Limberg (2014) a redução de volemia no sistema cardiovascular é similar à perda de sangue do indivíduo, o que afeta o controle de pressão, acionando mecanismos compensatórios. Entretanto, como citado por

Silva (2016), é importante salientar que as respostas cardíacas sofrem influência de outros fatores, com uma atenção especial a temperatura ambiente e o nível de hidratação do indivíduo, pois estes afetam diretamente no volume desse sistema.

Existem poucos estudos e os resultados são inconclusivos sobre os efeitos fisiológicos crônicos da exposição à aceleração e os possíveis impactos nas dimensões e função cardiovascular de pilotos de caça.

Em estudos realizados por Carter *et al.*, (2010) e Grossman *et al.*, (2011) não foram encontradas associação de alterações cardíacas estruturais ou funcionais em aviadores submetidos a forças de aceleração. No entanto, em ratos, as altas acelerações produziram lesões estruturais e funcionais no coração, como a diminuição significativa da pressão sistólica do ventrículo esquerdo (PSVE). Essas alterações podem estar parcialmente relacionadas ao metabolismo de radicais livres (Zhang *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2003). A exposição repetida poderia resultar na redução das atividades de enzimas lisossômicas e mitocondriais, indicando uma diminuição do metabolismo oxidativo no tecido do miocárdio (Zhang *et al.*, 2001)

Öztürk *et al.*, (2012) observaram que a exposição contínua à força Gz não afetou a estrutura anatômica e a função sistólica cardíaca, mas impactou a função diastólica do ventrículo direito. Essas alterações foram atribuídas à adaptação crônica às acelerações nos níveis de pressão da artéria pulmonar. Ambas as exposições, às acelerações +Gz e manobras respiratórias anti-G, resultam em mudanças significativas na pré-carga e pós-carga cardíaca, afetando especialmente a parede do ventrículo direito (Gul; Salmanoglu, 2012). No entanto, os dados destes estudos não foram suficientes para esclarecer os efeitos de longo prazo à exposição G, especialmente sobre as funções diastólica e sistólica cardíacas de pilotos.

Em um estudo conduzido por Martin *et al.* (1999), foi observada uma associação estatisticamente significativa entre insuficiência pulmonar, regurgitação tricúspide e exposição a altas forças Gz em pilotos de alta performance (n = 46) em comparação com não-pilotos (n = 201). Essa associação pode ser atribuída ao

aumento transitório da pressão no ventrículo direito devido às forças de aceleração ou manobras, atuando como um mecanismo protetor fisiológico para prevenir ou adiar a perda de consciência induzida por G-LOC.

Por outro lado, adaptações positivas foram observadas em pilotos expostos a forças G. O barorreflexo do piloto de caça parece ser mais sensível e eficaz no controle da pressão arterial, oferecendo proteção contra G-LOC. A exposição crônica a G também pode aumentar o volume sistólico e o débito cardíaco em situações ortostáticas, ao contrário do que ocorre após exposição à microgravidade. Os efeitos na frequência cardíaca ainda são pouco compreendidos, com relatos contraditórios (Newman *et al.*, 1998; Convertino, 2001).

Há uma interessante associação entre uma maior atividade do sistema nervoso simpático e a capacidade de tolerância à alta aceleração em indivíduos que participaram de testes de seleção de pilotos, durante as passagens na centrífuga (Zuzewicz *et al.*, 1996). No entanto, em análise do componente simpático de repouso, Zenon *et al.*, (2003) encontraram maior atividade simpática em pilotos supersônicos, comparados a não-pilotos, e atribuem esta predominância do SNS em pilotos a uma adaptação às repetidas exposições de elevada aceleração no eixo longitudinal a curto prazo.

Existe uma interessante associação entre maior a atividade do sistema nervoso simpático está associada à tolerância a altas acelerações em pilotos. Estudos mostram maior atividade simpática em pilotos supersônicos, possivelmente devido à adaptação às repetidas exposições de elevada aceleração no eixo longitudinal a curto prazo (Zuzewicz *et al.*, 1996; Zenon *et al.*, 2003). Em resumo, a exposição crônica à aceleração +Gz pode ter efeitos nocivos no coração dos aviadores de caça, mas esses efeitos ainda são controversos e carecem de estudos sistemáticos e medidas preventivas.

5 A VARIABILIDADE DA FREQUÊNCIA CARDÍACA E SUA APLICABILIDADE NA AVALIAÇÃO FISIOLÓGICA EM PILOTOS DE CAÇA

O sistema circulatório cardiovascular é alimentado por um músculo que funciona sem parar durante toda a vida do ser humano, e a sua frequência de batimentos é controlada pelo sistema nervoso com o propósito de restabelecer o equilíbrio hemodinâmico. Esse sistema possui a participação de vários órgãos e a sinalização nas vias eferentes, que indicam quais ações são necessárias em cada determinado momento e, além das respostas agudas, ocorrem adaptações crônicas diante do estresse enfrentado pelo indivíduo (Guyton; Hall, 2016).

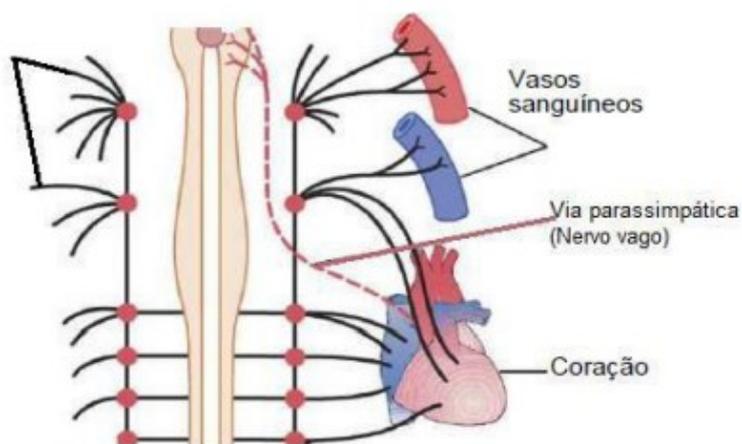
A regulação desse sistema ocorre de forma rápida por causa da ação do Sistema nervoso autônomo (SNA), em consequência aos estímulos dos barorreceptores arteriais, cardiopulmonares e musculares, que fazem parte da via aferente. As respostas e o controle cardíacos ocorrem por meio da via eferente, que são constituídas pelos ramos simpáticos e parassimpáticos. O primeiro aumenta significativamente a atividade cardíaca, tanto em aumento da frequência quanto no volume sanguíneo (débito cardíaco). Já o segundo atua na no sentido de redução da FC e força contrátil (Davis *et al.*, 2008; Joyner; Limberg, 2014; Guyton; Hall, 2016).

Na Figura 3, Guyton e Hall (2016) ilustram a anatomia de controle do SNA com uma linha preta contínua a via simpática e com uma linha vermelha tracejada a via parassimpática, composta pelos nervos vagos. A avaliação do sistema cardiovascular de pilotos de caça durante o voo é complexa devido a preocupações com segurança operacional. Além disso, é difícil usar grupos não-pilotos nessas condições de voo. Por esses motivos e para treinar pilotos em exposição à carga Gz, foram desenvolvidos equipamentos de centrífuga humana.

O simulador de voo dinâmico, conhecido como padrão-ouro para avaliação da tolerância à força Gz, é notável por sua capacidade de simular hipergravidade,

tanto em relação à taxa de incremento quanto à máxima aceleração atingida (Dourado e Matin, 2013).

Figura 3 – Anatomia do controle do sistema nervoso autônomo via simpática



Fonte: Adaptado de Guyton e Hall, 2016.

Na Suécia, onde os pilotos brasileiros estão sendo treinados para pilotar as novas aeronaves Gripen, o simulador de voo dinâmico do “*Flight Physiological Centre*” é capaz de atingir até 9G de aceleração tripulado e 15G sem tripulação. No entanto, o custo elevado dessas centrífugas humanas impede que diversos países, incluindo o Brasil, as utilizem para avaliação e treinamento de seus pilotos (Centre, 2021).

Para avaliar essas respostas do sistema cardiovascular, estudos demonstraram que a VFC é um método simples, de baixo custo e não invasivo que pode identificar e quantificar a atividade do SNA (Zenon *et al.*, 2003; Vanderley *et al.*, 2008). A análise da VFC se dá por meio do registro do período de intervalo de dois picos de onde R (RR), em virtude do maior potencial elétrico dentro do complexo PQRST. Os parâmetros analisados são divididos em lineares, com resultados no domínio da frequência e do tempo, e em parâmetros não lineares, tendo em vista que as respostas nos seres humanos são, em sua maioria, variáveis.

Nesses domínios, os algoritmos obtidos indicam a prevalência do ramo simpático e/ou parassimpático constituindo a modulação autonômica (Vanderlei *et al.*, 2009).

Em virtude dos avanços tecnológicos, equipamentos portáteis vêm sendo utilizados em mais diversos tipos de desafios: como respostas em atletas de elite (Reilly; Bangsbo; Franks, 2000) e própria modulação autonômica em pilotos (Sauvet *et al.*, 2009; Sá, 2015; Silva, 2016). Neste sentido, diversos estudos estão utilizando esses equipamentos para o registro e a avaliação da VFC (Sá, 2015; Silva, 2016 e Nascimento, 2023). A figura 4 demonstra a utilização de um colete para registros de variáveis fisiológicas, dentre elas a VFC, em um estudo que foi desenvolvido com um grupo de pilotos do Esquadrão de Demonstração Aérea (EDA) – Esquadrilha da Fumaça.

Esses dispositivos são dotados da capacidade de registro de diferentes tipos de dados, relativos aos parâmetros fisiológicos, nomeadamente eletrocardiograma, frequência cardíaca, frequência respiratória e temperatura da pele. Esse tipo de equipamento tem sido utilizado em pesquisas para avaliação desses parâmetros em situação operacional real, principalmente por não interferir nas ações de execução operacionais, demonstrando a confiabilidade e viabilidade do uso para o desenvolvimento de estudos (Centre, 2021; Vanderlei *et al.*, 2009; Reilly; Bangsbo; Franks, 2000; Liu *et al.*, 2013).

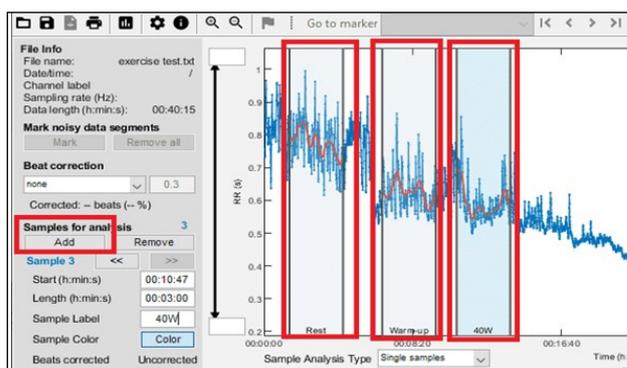
Figura 4 - Utilização de colete em pilotos militares



Fonte: Arquivo Pessoal.

Após o registro desses dados, eles devem ser analisados de acordo com a finalidade de cada estudo, ou grupo alvo a ser avaliado. A Figura 5 demonstra uma das etapas da análise da VFC, realizada por meio do programa Kubios HRV[®].

Figura 5 – Programa Kubios HRV Standard[®]



Fonte: Nascimento (2023).

Nesse sentido, dispositivos como coletes que possam ser fixados ao corpo do piloto, não interferem nas ações de pilotagem, preservando os índices de segurança operacionais, podendo se tornar uma ferramenta eficaz em estudos para avaliação do desempenho operacional em pilotos de caça.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Força Aérea Brasileira (FAB) tem se dedicado ao desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que otimizam processos e introduzem conceitos operacionais avançados. A aquisição contínua de equipamentos de última geração, como os caças F-39 Gripen-NG, é fundamental para preservar a soberania do espaço aéreo e garantir a eficácia das operações militares.

Neste estudo, exploramos a variabilidade da frequência cardíaca (VFC) como um indicador crucial para avaliar o desempenho dos pilotos de caça. A VFC oferece insights sobre o sistema nervoso autônomo e está associada tanto à

intensidade do esforço físico quanto ao nível de estresse. Nosso objetivo foi revisar a relação entre a VFC e o desempenho operacional desses aviadores.

A exposição regular a altas acelerações de Força +Gz é uma realidade enfrentada por poucas centenas de pilotos em todo o mundo, principalmente militares. Embora não tenham sido encontradas associações claras com alterações cardíacas estruturais ou funcionais em humanos, estudos em ratos indicam que altas acelerações podem causar lesões no coração. A exposição repetida pode afetar o metabolismo oxidativo do tecido do miocárdio. Além disso, a exposição contínua à força Gz impacta a função diastólica do ventrículo direito.

O estudo ressalta a importância de avaliar constantemente o sistema cardiovascular dos pilotos de caça durante o voo. Equipamentos como a centrífuga humana, que simula hipergravidade, são essenciais para entender como o corpo humano responde à força G durante manobras aéreas. No entanto, o alto custo dessas centrífugas impede que diversos países, incluindo o Brasil, as utilizem amplamente. Sugere-se investir em pesquisas adicionais para compreender melhor os efeitos da exposição crônica à aceleração +Gz e explorar alternativas mais acessíveis para avaliação e treinamento dos pilotos.

Esta pesquisa contribui para a compreensão dos desafios enfrentados pelos pilotos de caça e destaca a necessidade de abordagens multidisciplinares para garantir sua segurança e desempenho. Para trabalhos futuros, recomendamos investigar estratégias de treinamento específicas para mitigar os efeitos da força G e explorar tecnologias inovadoras que possam tornar a avaliação mais eficiente e acessível.

REFERÊNCIAS

BANKS, R.D. BRINKLEY, J.W., ALLNUTT, R., HARDING, R.M. **Human Response to Acceleration**. In: DAVIS, J.R. Fundamentals of aerospace medicine. 4a ed. Philadelphia. PA 19106 USA, 2008.

BENDITT D, G, FERGUSON, D. W., GRUBB, B. P., KAPOOR, W. N. *et al.* Tilt table testing for assessing syncope. **Journal of the American College of Cardiology**, v.28, n.1, p. 263-75, 1996.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando 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. (DCA 11-45)**. Boletim do Comando da Aeronáutica, Rio de Janeiro, nº 180, out. 2018.

BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. **Simpósio em Brasília (DF) apresenta capacidades do F-39 Gripen**. Disponível em: Acesso em: 27 de jan. 2021. Brasília – DF, 2020.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando Da Aeronáutica. **COPAC - 40 Anos. Revista eletrônica Comissão Coordenadora Do Programa Aeronave De Combate**. Brasília: [s.n.], 2021.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria DIRSA Nº 39/SECDTEC, de 31 de março de 2016, aprova a reedição da ICA 160-6 - **Instruções técnicas das inspeções de saúde na aeronáutica. (ICA 160-6)**. Boletim do Comando da Aeronáutica, Rio de Janeiro, nº 57, abr. 2016.

CARPENTER, M. G.; ALLUM, J. H. J.; HONEGGER, F. Vestibular influences on human postural control in combinations of pitch and roll planes reveal differences in spatiotemporal processing. **Experience Brain Research**, v. 140, p. 95–111, 2001.

CENTRE, The Flight Physiological. **The Dynamic Flight Simulator**. Linköping: FPC Sweden, 2021.

CONVERTINO, V. A. Mechanisms of blood pressure regulation that differ in men repeatedly exposed to high-G acceleration. **American Journal Physiology Regulatory Integrative Comp Physiology**, v.280. p.R947–R958, 2001.

DAVIS, J.R.; JOHNSON, R.; STEPANEK, J.; FOGARTY, J.A. **Fundamentals of Aerospace Medicine. 4th ed.** Wolters Kluwer, Philadelphia, USA, p.724, 2008.

DUSSAULT, C., JOUANIN, J.-C.; PORTIER, H.; SERRA, A. *et al.* Ortho-parasympathetic balance changes after aerobatics flights. **Sci Sports**, v. 17, n.5, p.254-259, 2002.

ELIAS NETO, J. Great arteries contribution in orthostasis cardiovascular adaptation. **Arq Bras Cardiol**, v.87, n.2, p. 209-22, 2006.

GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Tratado de Fisiologia Médica**. 13^a. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016

GRADWELL, D.P.; RAINFORD, D.J. **Ernsting's aviation and space medicine**. 4th ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA, p.893, 2016.

GROSSMAN, A., WAND, O.; HARPAZ, D.; PROKUPETZ, A.; ASSA, A. Acceleration forces and cardiac and aortic indexes in jet fighter pilots. **Aviat Space Environ Med.**; v.82, n.9, p.901-3, 2011.

GUEZENNEC, C.Y.; LOUISY, F.; PORTIER, H.; LAUDE, D.; CHAPUIS, B.; PLÉSANT, J. Effects of aerobatics flight on oxygen consumption and heart rate control: influence on autonomic cardiovascular regulation during recovery. **Eur J Appl Physiol**, v.84, n.6, p.562-8, 2001.

GUL M, SALMANOGLU M. Long-term high +Gz effects on cardiac functions in the pilots. **Anadolu Kardiyol Derg**, v.12, n.8, p.675, 2012.

HARGENS A.R.; BHATTACHARYA R.; SCHNEIDER S.M. Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. **European Journal of Applied Physiology**, v.113, p.2183–92, 2013.

HERNANDEZ, J.P, FRANKE, W.D. Age- and fitness-related differences in limb venous compliance do not affect tolerance to maximal lower body negative pressure in men and women. **J Appl Physiol**, v.97, n.3, p.925-9, 2004.

HINGHOFER-SZALKAY, H. Gravity, the hydrostatic indifference concept and the cardiovascular system. **European Journal of Applied Physiology**, v.111, n.2, p.163-74, 2011.

JOYNER, M.J.; LIMBERG, J.K. Blood pressure regulation: Every adaptation is an integration? **European Journal of Applied Physiology**, v. 114, n.3, p.445-450, 2014.

LINNARSSON, C. J. SUNDBERG, C. J.; TEDNER, B.; HARUNA, Y.; KAREMAKER, J. M., ANTONUTTO, G.; DI PRAMPERO, P. E. Blood pressure and heart rate responses to sudden changes of gravity during exercise. **Heart and circulatory Physiology**, v.270, n.6, 1996.

LIU, Y., ZHU, S. H.; WANG, G. H.; YE, F.; LI, P. Z. Validity and reliability of multiparameter physiological measurements recorded by the Equivital Life Monitor during activities of various intensities. **J Occup Environ Hyg**, v.10, n.2, p.78-85, 2013.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 3, p. 34-54, jun/jul. 2025.

MARÃES, V. Frequência cardíaca e sua variabilidade: análises e aplicações. **Revista andaluza de medicina del deporte**, v.1, n.3, p.33-42, 2010.

MARTIN, D.S., D'AUNNO, D. S.; WOOD, M. L.; SOUTH, D. A. Repetitive high G exposure is associated with increased occurrence of cardiac valvular regurgitation. **Aviat Space Environ Med**, v.70, n.12, p.1197-200, 1999.

MARTINELLI, F.S. **Respostas da frequência cardíaca e da pressão arterial sistêmica as manobras posturais passiva e de valsalva, em indivíduos sedentários e atletas corredores de longa distância.** Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas; 1996.

MONTASTRUC, J.L., SENARD, J.M., VERWAERDE, P., MONTASTRUC, P. Physiological mechanisms of cardiovascular adaptation to orthostatism. Role of the sympathetic nervous system and pharmacological implications. **Therapie**, v.49, n.2, p.81-7, 1994.

NASCIMENTO, E.K. **Análise de respostas autonômicas cardiovasculares de pilotos militares durante sequência de manobras acrobáticas.** 130f. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Força Aérea, Rio de Janeiro, 2023.

NEWMAN, D.G.; CALLISTER, R. Cardiovascular training effects in fighter pilots induced by occupational high G exposure. **Aviation Space Environmental Medicine**, v.79, n.8, p.774- 8, 2008.

NEWMAN, D.G.; WHITE, S.W.; CALLISTER, R. Evidence of baroreflex adaptation to repetitive +Gz in fighter pilots. **Aviat Space Environ Med**, v.69, n.5, p.446-51, 1998.

OZTURK, C.; ILBASMIS M.S.; AKIN, A. Cardiac responses to long duration and high magnitude +Gz exposure in pilots: an observational study. **Anadolu Kardiyol Derg.**; v.12, n.8, p.668-74, 2012.

RANGEL, A.N. FERREIRA, K.B.; DE QUEIROZ, K.R.S.M.; BARRETO, P.L.R. *et al.* **Desafios ao desenvolvimento da base industrial de defesa: A busca pela soberania nacional.** Ministério da Defesa. Disponível em: Acesso em: 25 de jan 2021, 2020.

REILLY, T.; BANGSBO, J.; FRANKS, A. Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. **Journal of Sports Sciences**, v.18, n.9, p.669–683, jan. 2000.

RUSSO, M.B.; STETZ, M.C.; THOMAS, M.L. Monitoring and predicting cognitive R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 3, p. 34-54, jun/jul. 2025.

state and performance via physiological correlates of neuronal signals. **Aviation Space Environmental Medicine**; v. 76, p. 59-63, 2005.

SÁ, G.B. **Efeitos fisiológicos da aviação de combate e do condicionamento cardiorrespiratório sobre o controle autônomo cardiovascular**. v. 81f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.

SCOTT, J.M.; ESCH B.T.; GOODMAN L.S.; BREDIN S.S.; HAYKOWSKY M.J.; WARBURTON D.E. Cardiovascular consequences of high-performance aircraft maneuvers: implications for effective countermeasures and laboratory-based simulations. **Appl Physiol Nutr Metab**, v.32, n.2, p.332-9, 2007.

SILVA, I.O. **Respostas autonômicas e cardiovasculares em voo e sua relação com a aptidão física**. v. 155f. Tese (Doutorado) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2016.

STEINKRAUS, L.W.; RAYMAN, R.B.; BUTLER, W.P.; MARSH, W.E.; COWL, C.T. Aeromedical decision making - It may be time for a paradigm change. **Aviation Space Environmental Medicine**, v. 83, p. 1006-1007, 2012.

SUNDBLAD, P.; KOLEGARD, R.; EIKEN O. G tolerance and the vasoconstrictor reserve. **Eur J Appl Physiol.**; v. 114, n.12, p.2521-8, 2014.

THOMAS, M.L.; RUSSO, M.B. Neurocognitive monitors: toward the prevention of cognitive performance decrements and catastrophic failures in the operational environment. **Aviation Space Environmental Medicine**; v. 78, n. 5, p.144-52, 2007.

VANDERLEI, L.C., PASTRE, C. M.; HOSHI, R. A.; CARVALHO, T. D.; GODOY, M. F. Basic notions of heart rate variability and its clinical applicability. **Rev Bras Cir Cardiovasc**, v.24, n.2, p.205-17, 2009.

ZHAN, H., DONG, H. J.; XIN, Y. M.; TANG, G. X. Effects of tea polyphenols on cardiac function and myocardial ultrastructure in rats after repeated +Gz stress. **Space Med Med Eng (Beijing)** v.12, n.2, p.79-83, 1999.

ZHAN, H., ZHANG, Z.; XIN, Y. M.; LI, T.; WEI, S. H. Changes of cardiac catecholamines in rats after repeated +Gz exposures and protective effects of low-G preconditioning and tea polyphenols. **Space Med Med Eng (Beijing)**, v.16, n.4, p.239-42, 2003.

ZHANG, Z., ZHAN, H.; LU, J. Y.; XIN, Y. M.; LI, T.; ZHANG, Q. J. Effects of repeated high +Gz exposure on several enzyme activities in cardiomyocytes in rats and some protective measures. **Space Med Med Eng (Beijing)**, v.14, n.6, p.410-3, 2001.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 3, p. 34-54, jun/jul. 2025.

ZUZEWICZ, K., KEMPA, G.; BIERNAT, B.; KWARECKI, K. Electrocardiograms were recorded in healthy men undergoing centrifugation and lower body negative pressure. Heart rate variability was studied in conjunction with acceleration tolerance. **J Gravit Physiol**, v.3, n.2, p.101-2, 1996.

ZENON, G., HETLOF, G.; PIOTROWSKI, G.; GOCH, A. Evaluation of the effect of flights in supersonic fighters on sinus rhythm variability parameters. **Mil Med.**, v.168, n.2, p91-5, 2003.

