

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de São Carlos

**Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas em operações de pulverização agrícola**

**Matheus Coelho Gonçalves**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Área de concentração: Aeronáutica

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Matheus Coelho Gonçalves**

**Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na  
pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves  
remotamente pilotadas em operações de pulverização  
agrícola**

**São Carlos**

**2024**



**Matheus Coelho Gonçalves**

**Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na  
pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves  
remotamente pilotadas em operações de pulverização  
agrícola**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Aeronáutica

Orientador: Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

**VERSÃO CORRIGIDA**

**São Carlos**

**2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G 635a	<p>Gonçalves, Matheus Coelho Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas em operações de pulverização agrícola / Matheus Coelho Gonçalves; orientador Jorge Henrique Bidinotto. São Carlos, 2024.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Aeronáutica -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.</p> <p>1. RPAS. 2. Fatores humanos. 3. Carga de trabalho. I. Título.</p>
-----------	--



## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MATHEUS COELHO GONÇALVES**.

Título da dissertação: "Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas em operações de pulverização agrícola".

Data da defesa: 20/06/2024.

### Comissão Julgadora

### Resultado

**Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto**

**(Orientador)**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

**Dr. Edmar Thomaz da Silva**

(Boeing)

Aprovado

**Prof. Dr. Moacyr Machado Cardoso Júnior**

(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**



## RESUMO

GONÇALVES, M. C. **Avaliação da carga de trabalho de pilotos remotos na pilotagem simultânea de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas em operações de pulverização agrícola.** 2024. 117p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Os avanços tecnológicos da última década permitiram um rápido crescimento do segmento dos sistemas de aeronaves remotamente tripuladas (RPAS), popularmente conhecidos como *drones*, tanto no que diz respeito ao número de operações quanto às possibilidades de aplicação. Em meio a essa grande popularização, especialmente no Brasil, ganham destaque os sistemas voltados para a pulverização de lavouras, dada a importância do setor agrícola para economia brasileira e ao potencial de aumento de produtividade com uso desses sistemas. Mesmo com o crescimento massivo, existem ainda muitos desafios a serem enfrentados para que todo o potencial dessa tecnologia possa ser explorado, especialmente no que diz respeito às operações mais complexas. Destacadamente, um tipo de operação de RPAS de pulverização que tem um enorme potencial de mercado, mas que possui restrições de regulamentação para ocorrer de forma rotineira, são as que envolvem mais de uma aeronave remotamente pilotada (RPA) por piloto remoto. No caso dessas operações, um dos principais desafios está na compreensão dos impactos da relação entre o homem e o sistema na segurança da operação, *i.e.*, o impacto dos fatores humanos nas operações dos sistemas não tripulados. Nesse contexto, o objetivo proposto neste trabalho foi reunir informações para avaliar o impacto dos fatores humanos nas operações de pulverização agrícola envolvendo a pilotagem de múltiplas RPAs por piloto remoto. Para alcançar esse objetivo, propôs-se a realização de testes de avaliação de carga de trabalho mental em ambiente simulado. Nos testes propostos, pilotos com diferentes níveis de experiência foram submetidos a execução uma série de tarefas que buscaram simular o tipo de demanda esperada durante uma operação normal de uma ou mais RPAs de pulverização. No decorrer da execução dessas tarefas, dados de carga de trabalho dos participantes foram obtidos através de medições objetivas e subjetivas. Esses dados foram utilizados para avaliar o impacto do aumento do número de aeronaves remotamente pilotadas na capacidade de execução das tarefas de pilotagem pelos pilotos. Os resultados obtidos a partir desse estudo revelaram aspectos importantes quanto ao efeito do aumento do número de aeronaves sob supervisão do piloto em sua carga de trabalho mental. Sumariamente, os dados encontrados apontam que, para as condições propostas, embora seja possível um piloto supervisionar mais de uma RPA simultaneamente, a carga de trabalho aumenta consideravelmente com cada adição de RPA. Diante desses achados, propõe-se a necessidade considerar novos estudos e recursos de projeto e operacionais que possam contribuir para a redução da carga de trabalho do piloto remoto durante esse tipo de operação.

**Palavras-chave:** RPAS. Fatores Humanos. Carga de Trabalho.

## ABSTRACT

GONÇALVES, M. C. **Workload assessment of remote pilots in the simultaneous piloting of multiple remotely piloted aircraft in agricultural spraying operations.** 2024. 117p.  
Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Technological advances in the last decade have enabled rapid growth in the segment of the unmanned aircraft systems (UAS), commonly known as drones, both in terms of the number of operations and application possibilities. Amidst this widespread adoption, especially in Brazil, systems focused on crop spraying stand out due to the importance of the agricultural sector to the Brazilian economy and the potential for increased productivity through the use of such systems. Despite massive growth, there are still challenges to be addressed for the exploration of the full potential of this technology, particularly regarding more complex operations. Notably, one type of drone spraying operation with significant market potential but currently facing regulatory restrictions for routine occurrence is those of multiple remotely piloted aircraft (RPA) *per* remote pilot. In this case, one of the main challenges lies in understanding the impacts of the human-system relationship on operational safety, *i.e.*, the impact of human factors on unmanned system operations. Thus, the objective of this work was to gather information to assess the impact of human factors on agricultural spraying operations in which multiple drones are supervised by a single remote pilot. To achieve this objective, tests were proposed in a simulated environment to evaluate the pilot's mental workload. In these tests, pilots with different levels of experience were asked to execute a series of tasks aimed at simulating the expected demand during a normal operation of one or more spraying drones. Throughout the execution of these tasks, participants' workload data were obtained through both objective and subjective measurements. These data were used to assess the impact of increasing the number of remotely piloted aircraft on pilots' task execution capacity. The results obtained from this study revealed significant aspects regarding the effect of increasing the number of aircraft under the pilot's supervision on their mental workload. In summary, the data indicate that, under the proposed conditions, although it is possible for a pilot to supervise multiple drones simultaneously, the workload increases considerably with each addition of an unmanned aircraft. Given these findings, there is a proposed need to consider new studies and design and operational resources that can contribute to reducing the remote pilot's workload during such operations.

**Keywords:** UAS. Human Factors. Workload.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aeronave remotamente pilotada asa-fixa de grande porte Northop Grumman RQ-4 Global Hawk®. . . . .	18
Figura 2 – Aeronave remotamente pilotada multirotor de pequeno porte DJI Phantom 4®.	19
Figura 3 – Número de <i>drones</i> cadastrados na ANAC entre 2017 e 2021. . . . .	19
Figura 4 – Estação de controle do RPAS DJI Agras T30®. . . . .	29
Figura 5 – Estação de controle do RPAS Hermes 900®. . . . .	30
Figura 6 – RPAs asa-fixa de uso civil de mapeamento (a) SenseFly Ebee X®; (b) Xmo-bots Arator 5C®. . . . .	34
Figura 7 – Sistema DJI Mavic Air 2® formado por: (a) Aeronave Remotamente Pilotada; e (b) Controle Remoto. . . . .	36
Figura 8 – RPA pulverizador Agras T30® da fabricante DJI. . . . .	36
Figura 9 – Aeronave híbrida Penguin C VTOL UAS. . . . .	37
Figura 10 – Tipos de operações de RPAS e aplicações relacionadas. . . . .	41
Figura 11 – Exemplo de missão de pulverização com dois polígonos de voo. . . . .	46
Figura 12 – Representação do modelo de processamento de informação humana de três estágios. . . . .	48
Figura 13 – Representação do modelo mais detalhado de processamento de informação humana de três estágios. . . . .	50
Figura 14 – Representação do modelo comportamental humano . . . . .	52
Figura 15 – RPAS de pulverização STRATUS H12®. . . . .	61
Figura 16 – GCS do RPAS STRATUS H12®. . . . .	63
Figura 17 – Participante executando o experimento: supervisão de três RPAs simultaneamente. . . . .	70
Figura 18 – Carga de trabalho mental percebida pelos participantes segundo a escala ISA (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5. . . . .	82
Figura 19 – Carga de trabalho na escala ISA de todos os participantes (a) valores individuais reportados e a média; (b) distribuição dos valores reportados. . . . .	84
Figura 20 – Valores de carga de trabalho média por etapa na escala ISA (a) médias individuais por etapa; (b) distribuição das médias individuais por etapa. . . . .	87
Figura 21 – Carga de trabalho na escala ISA padronizada por subetapa (a) por participante; (b) distribuição do grupo. . . . .	88
Figura 22 – Carga de trabalho na escala ISA padronizados por etapa (a) por participante; (b) distribuição do grupo. . . . .	88
Figura 23 – Pesos das dimensões da escala NASA-TLX por participantes (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5. . . . .	90

Figura 24 – Carga de trabalho global, mental e temporal percebidas pelos participantes por etapa segundo a escala NASA-TLX (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.	92
Figura 25 – Carga de trabalho global NASA-TLX padronizada por etapa . . . . .	93
Figura 26 – Cargas de trabalho Mental e Temporal NASA-TLX padronizadas por etapa .	94
Figura 27 – Distribuição de carga de trabalho padronizada NASA-TLX do grupo (a) por tipo de fator; (b) por etapa. . . . .	94
Figura 28 – Carga de trabalho global NASA-TLX versus Média ISA por etapa de cada participante (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5. . . . .	95
Figura 29 – Carga de trabalho NASA-TLX vs. Média ISA por etapa (a) média do grupo (b) por participante. . . . .	96
Figura 30 – Médias das componentes tônica e fásica da atividade eletrodérmica de cada participante por subetapa (a1) Tônica P1; (a2) Fásica P1; (b1) Tônica P2; (b2) Fásica P2; (c1) Tônica P4; (c2) Fásica P4 (d1) Tônica P5; (d2) Fásica P5.	97
Figura 31 – Distribuição dos valores padronizados das componentes tônica e fásica. . . .	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos cenários propostos para o experimento. . . . .	60
Tabela 2 – Dados de desempenho da RPA STRATUS H12 ® . . . . .	61
Tabela 3 – Informações dos pilotos participantes . . . . .	69
Tabela 4 – Escala ISA com descrição. . . . .	74
Tabela 5 – Definições das dimensões da carga de trabalho e extremos das subescalas NASA-TLX . . . . .	75
Tabela 6 – Resultados compilados ISA por subetapa. . . . .	85
Tabela 7 – As médias e desvios padrão por etapa . . . . .	87



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGL	<i>Above Ground Level</i>
ANAC	Agência Nacional da Aviação Civil
BRLOS	<i>Beyond Radio Line-Of-Sight</i>
BVLOS	<i>Beyond Visual Line-Of-Sight</i>
CDA	<i>Continuous decomposition analysis</i>
C2	Comando e controle
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ECG	Eletrocardiograma
EDA	<i>Electrodermal activity</i>
EEG	Eletroencefalograma
EVLOS	<i>Extended Visual Line-Of-Sight</i>
GCS	<i>Ground Control Station</i>
GSR	<i>Galvanic Skin Response</i>
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ISA	<i>Instantaneous Self Assessment</i>
ISTAR	<i>Intelligence, Surveillance, Target Acquisiton and Reconnaissance</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NASA-TLX	<i>NASA Task Load Index</i>
NOTAM	<i>Notice to Airman</i>
PIC	<i>Pilot-In-Command</i>
RBAC-E	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial
RLOS	<i>Radio Line-Of-Sight</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>

RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RPS	<i>Remotely Piloted Station</i>
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
UA	<i>Unmanned Aircraft</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft Systems</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	<i>Visual Line-Of-Sight</i>
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto regulatório</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação e objetivos</b>	<b>23</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do documento</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPAS</b>	<b>25</b>
2.1.1	Definição	25
2.1.2	Principais subsistemas	27
2.1.2.1	Aeronave Remotamente Pilotada – RPA	27
2.1.2.2	Estação de Pilotagem Remota – RPS	28
2.1.2.3	Enlace de Comando e Controle – Enlace C2	31
2.1.3	Tipos de RPAS	32
2.1.3.1	Geração de sustentação	32
2.1.3.1.1	RPAS asa-fixa	33
2.1.3.1.2	RPAS multirotor	34
2.1.3.1.3	Outras classes de sistemas	37
2.1.3.2	Níveis de automatização	38
<b>2.2</b>	<b>Operações de RPAS</b>	<b>39</b>
2.2.1	Tipos de operação de RPAS com base na linha de visada	40
2.2.2	Pessoas envolvidas e requisitos de treinamento	41
2.2.3	Volumes operacionais	42
2.2.4	Considerações sobre risco nas operações de RPAS	43
2.2.4.1	Procedimentos anormais e de emergência	44
2.2.5	Operações de pulverização	45
<b>2.3</b>	<b>O desempenho humano como operador de máquinas</b>	<b>47</b>
2.3.1	Modelos de processamento de informação	48
2.3.2	Modelos de atenção e comportamento humano	50
2.3.3	Métodos de avaliação da carga de trabalho mental	53
2.3.4	Consciência situacional	55
2.3.5	Fatores Humanos nas operações de RPAS	56
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Visão geral do experimento</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>RPAS Simulado</b>	<b>60</b>
3.2.1	RPA	60

3.2.2	GCS . . . . .	62
3.2.2.1	<i>Software</i> de planejamento, monitoramento e controle de voo . . . . .	63
<b>3.3</b>	<b>Identificação das tarefas e cenários . . . . .</b>	<b>64</b>
3.3.1	Condições normais de operação . . . . .	64
3.3.2	Condições anormais e de emergência . . . . .	66
<b>3.4</b>	<b>Participantes . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>3.5</b>	<b>Equipamentos . . . . .</b>	<b>69</b>
3.5.1	Simulador . . . . .	69
3.5.1.1	<i>Hardware</i> . . . . .	69
3.5.1.2	<i>Software</i> . . . . .	70
3.5.2	Sensor de atividade eletrodérmica (EDA) . . . . .	71
<b>3.6</b>	<b>Escalas subjetivas . . . . .</b>	<b>73</b>
3.6.1	<i>Instantaneous Self Assessment</i> (ISA) . . . . .	73
3.6.2	<i>NASA Task Load Index</i> (NASA-TLX) . . . . .	74
<b>3.7</b>	<b>Missões simuladas . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>3.8</b>	<b>Procedimentos . . . . .</b>	<b>77</b>
3.8.1	Preparações iniciais e familiarização . . . . .	77
3.8.2	Aquisição dos dados . . . . .	78
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>4.1</b>	<b>ISA . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>4.2</b>	<b>NASA-TLX . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>4.3</b>	<b>ISA versus NASA TLX . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>4.4</b>	<b>EDA . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLA- RECIDO . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE B – FICHAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>B.1</b>	<b>Ficha de monitoramento de voo . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>B.2</b>	<b>Ficha com os procedimentos anormais e de emergência (etapa 2) . . . . .</b>	<b>112</b>
<b>B.3</b>	<b>Ficha com a escala ISA . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>B.4</b>	<b>Ficha com as instruções para a escala NASA-TLX . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>B.5</b>	<b>Ficha com a escala NASA-TLX . . . . .</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ideia da existência de aeronaves não tripuladas ocupando os espaços aéreos ao redor do planeta já habita o imaginário coletivo há muitos anos. Desde o início da história da aviação, não faltaram esforços por parte de entusiastas, dos diversos setores da indústria e das principais organizações de pesquisa e desenvolvimento do mundo para tornar esse tipo de tecnologia uma realidade. Contudo, graças aos incomparáveis investimentos em novas tecnologias, foi a indústria militar quem dominou o desenvolvimento e utilização desses sistemas por muitos anos.<sup>[1] [2]</sup>

O primeiros registros de uso de aeronaves não tripuladas, popularmente conhecidas como *drones*, para aplicações militares datam do fim do século XIX, quando balões não tripulados de forças austríacas foram usados para transportar e lançar bombas em Veneza.<sup>[3]</sup> No entanto, foi só a partir da primeira grande guerra, já no início do século XX, que o desenvolvimento desses sistemas se alavancou, aproveitando-se dos surgimentos e da evolução de outras tecnologias, como sistemas de comunicação via rádio e sistemas de estabilização automáticos. Nesse período, os veículos aéreos não tripulados eram usados principalmente como uma espécie de míssil, sendo carregados de explosivos e atirados contra as linhas inimigas.<sup>[2] [4] [5] [6]</sup>

Durante o período inter-guerras e com o advento da segunda grande guerra vieram novos avanços tecnológicos maciços. Foram os investimentos desse período que proporcionaram as primeiras produções de larga escala de projetos de aeronaves não tripuladas para uso militar. Uma das principais aplicações do período era o uso desses veículos como alvos para treinamento de pilotos e testes de caças. Apesar do surgimento de projetos específicos, muitos *drones* da época foram desenvolvidos a partir de adaptações de aeronaves tripuladas (geralmente obsoletas), que passavam a ser remotamente controladas para cumprir as missões de interesse.<sup>[2] [4]</sup>

Já nos combates e disputas relacionados ao contexto que ficou mundialmente conhecido como Guerra Fria, o desenvolvimento de novos tipos de sensores e a ampliação do desempenho dos *drones*, principalmente relacionados à sistemas de navegação, permitiu a consolidação do uso desses equipamentos em missões de reconhecimento. O uso de sistemas não tripulados para missões de reconhecimento acabou se tornando uma das características mais marcantes desse conflito.<sup>[4]</sup>

Esse primeiro momento do desenvolvimento dos *drones*, dadas as necessidades dos militares e a própria trajetória do desenvolvimento tecnológico do último século, fizeram com que os sistemas aéreos não tripulados evoluíssem majoritariamente como aeronaves de asa-fixa, de relativo grande porte, extremamente velozes, capazes de operar em altas altitudes, com grande alcance e autonomia, com decolagem e pouso por pista e outras características operacionais muito similares as das aeronaves tripuladas.<sup>[2] [4]</sup> Por essa razão, o termo *drone* ou veículos aéreo não tripulado passou a ser associado, muitas vezes, a figuras de aeronaves como o General Atomics

MQ-1 Predator®, o MQ-9 Reaper® e o Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk® (Figura 1).

Figura 1 – Aeronave remotamente pilotada asa-fixa de grande porte Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk®.



Fonte: Northrop Grumman<sup>[7]</sup>.

Foi apenas na última década que os avanços tecnológicos e a diminuição dos preços dos componentes, principalmente no que diz respeito à sistemas de armazenamento de energia, navegação e controle embarcados, permitiram a popularização do uso de *drones* na esfera civil. Com os menores preços, o maior número de funcionalidades disponíveis e o surgimento de equipamentos eletrônicos de tamanho reduzido, diversos setores da indústria, assim como instituições de ensino e pesquisa, começaram a desenvolver diferentes tipos de sistemas de aeronaves não tripuladas para as mais diversas aplicações.<sup>[1] [8]</sup>

Graças aos novos atores e, conseqüentemente, aos novos interesses de aplicação da tecnologia, novos conceitos de veículos não tripulados começaram a aparecer com maior frequência – *i.e.*, além dos “tradicionais” asas-fixas de médio e grande porte. Particularmente a configuração multirotor se popularizou consideravelmente nos últimos anos por sua versatilidade e facilidade de operação. Com isso, sistemas como o multirotor de pequeno porte DJI Phantom 4® (Figura 2) são cada vez mais comuns no dia-a-dia.

Atualmente, são inúmeros os usos civis previstos para sistemas não tripulados, tanto do ponto de vista comercial quanto recreativo. As aplicações variam desde ensaios fotográficos e apresentações de luzes até uso para inspeções em linhas de transmissão de energia, combate a desastre naturais, aquisição de dados e pulverização de colheitas, levantamentos topográficos, transporte de bens, vigilância, entre vários outros.<sup>[10] [1]</sup> Mais recentemente a indústria de *drones* tem dado passos consistentes para iniciar, inclusive, o uso desse tipo de equipamento como solução de transporte urbano.<sup>[11]</sup>

As possibilidades de uso de *drones* são tamanhas e os conceitos operacionais desse tipo de sistema se adequaram tanto a dinâmica da sociedade contemporânea que estudos recentes estimam que o número de aeronaves não tripuladas vai superar, em muito, o número de aeronaves

Figura 2 – Aeronave remotamente pilotada multirotor de pequeno porte DJI Phantom 4®.

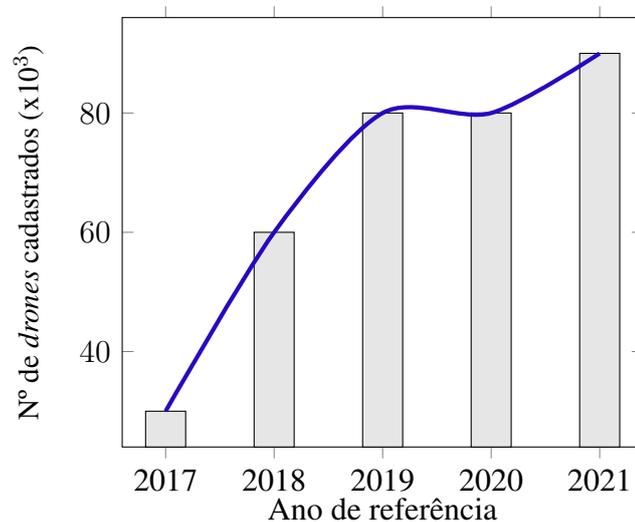


Fonte: DJI<sup>[9]</sup>.

tripuladas em um futuro próximo.<sup>[10] [12]</sup>

Esse crescimento também pode ser observado em âmbito nacional. Dados disponibilizados pela Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC)<sup>[13]</sup> indicam que o número de *drones* registrados no Brasil triplicou entre 2017<sup>a</sup> e 2021, como pode ser observado na Figura 3. Na mesma figura, destaca-se também a tendência de crescimento desse número (linha azul)<sup>b</sup>.

Figura 3 – Número de *drones* cadastrados na ANAC entre 2017 e 2021.



Fonte: Adaptado de ANAC<sup>[13]</sup>.

Em meio a essa grande popularização dos *drones*, especialmente no Brasil, ganha destaque os sistemas voltados para o setor agrícola. Isso ocorre devido, entre outros fatores, à

<sup>a</sup> Ano do início dos cadastros com a publicação da Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial Número 94 (RBAC-E N°94).<sup>[14]</sup>

<sup>b</sup> Uma possível explicação para a estabilização observada entre 2019 e 2020 está no fato de o período de validade dos cadastros ser de dois anos<sup>[14]</sup>, assim, os cadastros realizados em 2017 e não renovados foram excluídos do sistema.

importância desse setor para a economia brasileira<sup>[15]</sup>, a possibilidade de operações com níveis de risco mais baixos (normalmente voos em áreas remotas), além, é claro, dos potenciais benefícios do uso de *drones* para esse tipo de aplicação. Não à toa, dos dezesseis projetos já autorizados pela ANAC até a escrita desse texto, treze estão majoritariamente relacionados a operações de mapeamento e pulverização agrícola.<sup>[16]</sup>

Especialmente em relação aos *drones* de pulverização, a eficiência apresentada por esses sistemas na aplicação de produtos nas lavouras têm gerado um número cada vez maior de adeptos. Mesmo com um custo relativamente alto, os drones de pulverização, graças as suas características únicas, são capazes de atuar com precisão e agilidade em áreas de difícil acesso para muitos dos equipamentos de pulverização convencionais, como aviões e tratores, gerando um grande potencial de aumento de produtividade nas lavouras. Por essas e outras razões, o número de registro desse tipo de sistema na ANAC tem crescido significativamente nos últimos anos.<sup>[17]</sup>

Contudo, mesmo com o crescimento massivo, existem ainda muitos desafios a serem enfrentados para que todo o potencial dos sistemas não tripulados possa ser explorado. Uma das áreas que mais carecem de estudos é a relação entre o homem e o sistema durante a operação, *i.e.*, os fatores humanos relacionados a operações de sistemas não tripulados.<sup>[18]</sup> Isso porque, nas operações de sistemas não tripulados, as interações do piloto (e demais pessoas envolvidas na operação) com o sistema apresentam uma série de elementos únicos, com variáveis e condições muito distintas daquelas encontradas em sistemas tripulados – tópico já amplamente estudado e com conceitos relativamente bem definidos<sup>[18]</sup>. Além disso, apesar dos avanços, operações autônomas (*i.e.*, sem a possibilidade de interação humana) ainda não têm previsão de se tornarem uma realidade nos próximos anos.<sup>[19]</sup> Dessa forma, o ser humano continuará sendo uma variável muito importante no processo de avaliação da segurança das operações de sistemas não tripulados, que evoluem a cada dia.

Destacadamente, um tipo de operação que possui um enorme potencial em termos de eficiência, considerando diversas aplicações, e onde o impacto do estudo do componente humano e sua relação com o sistema é de extrema importância são as operações envolvendo mais uma aeronave por piloto remoto. Operações com esse conceito, no mundo da aviação, só são possíveis graças as características únicas dos sistemas não tripulados.<sup>[20]</sup> Por essa razão, e considerando que é relativamente recente a viabilidade tecnológica para condução de operações com essas características em esfera civil, muitos dados ainda são necessários para compreender os reais impactos das limitações da capacidade humana nesse tipo de operação.

Do ponto de vista econômico, tomando como premissa a necessidade de participação humana em operações de *drones*, quanto maior a relação entre o número de sistemas por indivíduo, maior a vantagem competitiva dos veículos não tripulados em relação aos tripulados. Em aplicações como as relacionadas à agricultura, por exemplo, em que os sistemas não tripulados e tripulados podem competir em um mesmo nicho, essa relação pode significar a viabilidade ou não de participação no mercado. Dessa forma, o estudo do impacto na segurança do componente

humano em operações de *drones*, é fundamental para se criar mecanismo para viabilizar a pilotagem segura de diversos veículos não tripulados simultaneamente.

## 1.1 Contexto regulatório

Por integrarem o sistema aéreo global, a regulamentação dos *drones* cabe às mesmas organizações responsáveis pela regulamentação da aviação tripulada. No entanto, por se tratar de um tipo de sistema relativamente recente e sem muitos precedentes, não há uma padronização global, como ocorre com a aviação convencional, cabendo a cada Estado (ou uniões político-econômicas de Estados) criar normas e regulamentos que atendam, da melhor forma possível, as demandas do setor dentro dos seus territórios.<sup>[21]</sup>

Afim de evitar que a regulamentação caminhe reativamente, isto é, evolua como consequência de acontecimentos catastróficos (como foi o caso, em alguns momentos, da aviação tripulada), e mesmo porque o tipo de sistema permite isso, a regulamentação das aeronaves não tripuladas nos principais órgãos reguladores do mundo tem sido bastante restritiva. Em outras palavras, a tendência inicial é impor severas limitações nas operações autorizadas de sistemas não tripulados para que, com isso, o nível de segurança global seja mantido. Enquanto isso, novos estudos são realizados no intuito de desenvolver regulamentações para permitir operações mais complexas mantendo esse mesmo nível de segurança.<sup>[14]</sup>

No Brasil, ao contrário do que ocorre em vários outros países, a regulamentação das operações de sistemas aéreos é dividida majoritariamente entre duas organizações. Por um lado, a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) é a responsável pela regulação e fiscalização das atividades gerais da aviação civil e da infraestrutura aeroportuária.<sup>[22]</sup> Dessa forma, é a ANAC que estabelece os requisitos para a autorização de operações e para certificação de sistemas e pilotos. Por outro lado, todos os aspectos que envolvem o acesso e a utilização do espaço aéreo nacional são coordenados pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), organização militar subordinada ao Comando da Aeronáutica.<sup>[23]</sup>

Nesse contexto, no que diz respeito à ANAC, as operações de sistemas aéreos não tripulados são regidas, desde sua publicação inicial em 2017, pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial número 94 (RBAC-E 94).<sup>[14]</sup> Esse regulamento isenta da necessidade de autorizações especiais operações de sistemas não tripulados de até 25 *kg*, em que a aeronave permanece, a todo instante, no campo de visão do piloto remoto ou de um observador e nas quais a altura do voo não ultrapassa 120 *m* acima do nível do solo (AGL, do termo em inglês *above ground level*). Por outro lado, exceto para poucas exceções, em qualquer operação que não atenda algum desses requisitos, o sistema deve passar por um processo de autorização de projeto, isto é, um processo no qual a ANAC avalia o sistema segundo uma série de requisitos relacionados a segurança e confiabilidade do projeto e dos procedimentos de fabricação e operação – o nível de rigor dos requisitos é diretamente ligado ao peso e condições de operação.

Uma das exceções a essa regra são justamente os *drones* voltados para atividades de aplicação de agrotóxicos, ou seja, pulverizadores. Desde da publicação da Resolução nº170 de 31 de março de 2023 sistemas não tripulados desse tipo também não necessitam que qualquer tipo de autorização para operar, desde que operados dentro da linha de visada dos pilotos (ou observadores) e abaixo de 120 *m* AGL.<sup>[24]</sup> Essa flexibilização na regra se deve ao entendimento, por parte da Agência, de que esse tipo de operação, que por essência é realizado em áreas pouco habitadas e com velocidades relativamente baixas, apresenta um nível de risco aceitável sem a necessidade de avaliações especiais. Essa resolução também tem o intuito de incentivar o desenvolvimento dessa tecnologia no setor agrícola.<sup>[25]</sup>

Vale destacar que todos os casos citados acima consideram apenas operações em que cada piloto é responsável por uma única aeronave não tripulada. Operadores que tenham o interesse de usar qualquer sistema de aeronaves não tripuladas em operações envolvendo múltiplas aeronaves por piloto remoto devem enviar uma descrição completa da operação a ser executada, incluindo análises de risco, para que a Agência possa determinar se elas podem ser conduzidas. Mesmo essa condição só começou a ser prevista em regulamento a partir da publicação da primeira emenda do RBAC-E nº 94, em 01 de junho de 2021<sup>[14]</sup>. Antes disso, operações desse tipo eram proibidas pelo regulamento. Com isso, operadores que desejassem operar com mais de uma aeronave por piloto remoto deveriam solicitar um oneroso processo de isenção de requisito, artifício previsto pela autoridade que permite ao requerente solicitar o não cumprimento de qualquer requisito previsto em regulamento desde que devidamente demonstrado que tal isenção não afete a segurança das operações, não produza impactos ambientais adversos ou que atenda ao interesse público com níveis de segurança e impacto ambientais aceitáveis.<sup>[26]</sup>

De forma geral, autorizações para esse tipo de operação tem se limitado a aplicações muito específicas, com ambientes bem controlados e com sistemas relativamente simples. Esse é o caso das operações do tipo *swarm* voltadas para espetáculos aéreos, onde um grande número de *drones* de pequeno porte, com luzes instaladas, voam de forma sincronizada em um volume relativamente reduzido para produzir diferentes formas no ar.<sup>[27]</sup> Nessas operações, todas as aeronaves atuam em sincronia, podendo ser percebidas pelo piloto remoto como um único conjunto, o que facilita a consciência situacional. Autorizações para operações nas quais cada aeronave atua de forma relativamente independente, realizando missões específicas, contudo, apesar do grande potencial em termos de eficiência para diversas aplicações (*e.g.*, pulverização e inspeções), são mais raras, principalmente quando considerados sistemas de maior porte.

Por fim, em relação ao DECEA, o conjunto de normas e procedimentos que regulamentam o acesso ao espaço aéreo por sistemas não tripulados é dado pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) número 100-40.<sup>[28]</sup> Essa norma define as condições de acesso ao espaço aéreo por *drones* de forma a garantir a segurança global do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Dentre as condições estabelecidas, destaca-se a necessidade de solicitação de segregação do espaço aéreo por meio de emissão de Aviso aos Aeronavegantes

(NOTAM, do termo em inglês *Notice to Airman*) para operações além da linha da visada do piloto remoto, acima de 120 m AGL, ou com aeronaves com mais de 25 kg (exceto pulverizadores agrícolas). Operações próximas a aeródromos também são limitadas pelo regulamento.

## 1.2 Motivação e objetivos

Apesar do amplo crescimento do setor, muitos desafios ainda precisam ser enfrentados para que a sociedade possa usufruir de todo o potencial dos sistemas de aeronaves não tripuladas. O desenvolvimento de mecanismos que permitam a autorização de operações complexas de drones de forma prática, eficiente e segura passa pela compreensão, por parte dos órgãos reguladores e demais entidades envolvidas, de todas as características dessas operações, assim como dos possíveis impactos na segurança de pessoas e propriedades em geral.

Especificamente para os casos envolvendo diversas aeronaves remotamente pilotadas realizando missões independentes<sup>c</sup> e sendo monitoradas e comandadas por um único piloto remoto, muito ainda precisa ser estudado para compreender os reais impactos do componente humano na segurança da operação. Operações com esse conceito, caso viabilizadas, têm o potencial de causar um efeito positivo enorme no mercado dos *drones*, em diversas aplicações, uma vez que podem gerar um ganho em termos de eficiência e redução de custo que dificilmente será superado pelos meios convencionais, principalmente onde há concorrência com sistemas tripulados (como é o caso da pulverização de lavouras).

Nesse contexto, e considerando a adequação dos estudos aqui desenvolvidos com o que é esperado nos âmbitos regulatório, tecnológico e de infraestrutura disponível para operação desses tipos de sistemas nos próximos anos, os objetivos específicos do presente projeto de pesquisa são:

- elaboração de planos de ensaios e aquisição de dados que permitam mensurar a carga de trabalho de pilotos remotos supervisionando diferentes quantidades de aeronaves não tripuladas em operações de pulverização agrícola;
- avaliação, a partir dos dados obtidos, dos impactos na carga de trabalho dos pilotos do aumento do número de aeronaves não tripuladas sob sua supervisão em operações de pulverização agrícola;
- proposição de novos ensaios e estudos para complementar as análises realizadas e resultados alcançados ao longo desse trabalho.

Algumas das questões a serem respondidas com o conjunto de tarefas propostas nesse estudo são:

<sup>c</sup> Nesse contexto o termo “independente” se refere a desvinculação do movimento de uma aeronave em relação as outras. O oposto seriam operações coordenadas, nas quais as aeronaves se comportam com um único sistema “macro”, como é o caso de espetáculos aéreos.

- É possível, do ponto de vista de carga de trabalho do piloto remoto, se pilotar múltiplas aeronaves remotamente pilotadas de pulverização simultaneamente, considerando as tecnologias e condições de operação tipicamente encontradas no mercado atual?
- Qual o impacto na carga de trabalho do piloto remoto com a adição de um número cada vez maior de aeronaves não tripuladas?
- É possível considerar recursos de projeto e operacionais que possam contribuir para a redução da carga de trabalho do piloto remoto durante esse tipo de operações?
- Há uma concordância nos dados de carga de trabalho obtidos através dos diferentes métodos de avaliação?

### **1.3 Estrutura do documento**

Esse documento está organizado de forma a apresentar, além deste capítulo introdutório, que apresentou uma visão geral dos conceitos abordados e do contexto da tecnologia atualmente, mais quatro capítulos, cada qual ligada a uma etapa específica do projeto.

Inicialmente, o capítulo “Fundamentação Teórica” (Capítulo 2) apresenta o embasamento teórico necessário para a realização do projeto proposto, resultado de revisões bibliográficas e outros estudos. Em sequência, no capítulo “Materiais e Métodos” (Capítulo 3), é descrito como se pretendeu alcançar os objetivos propostos nesse projeto considerando o que foi apresentado também na fundamentação teórica. No capítulo “Resultados e discussões” (Capítulo 4), os dados obtidos com a aplicação dos métodos propostos são apresentados e discutidos. Por fim, o capítulo final “Conclusão” (Capítulo 5) traz as principais conclusões do estudo realizado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPAS

Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente no meio civil, ainda existem muitas divergências com relação a conceitos e definições no âmbito dos sistemas de aeronaves não tripuladas. Mesmo o nome utilizado para designar esses sistemas, assim como as siglas que os identificam, variam, a depender do contexto considerado. Sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS, do termo em inglês *unmanned aircraft system*), drones, veículos aéreos não tripulados (VANTs ou UAVs, do termo em inglês *unmanned aerial vehicles*) e Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS, do termo em inglês *remotely piloted aircraft system*), são apenas algumas das nomenclaturas encontradas nas publicações (oficiais ou não) relacionadas a esse tema. A presente seção traz as definições adotadas nesse estudo, além de algumas classificações que definem os tipos de sistemas existentes.

#### 2.1.1 Definição

Por sua relevância no âmbito internacional, atuando como ponto focal para harmonização da aviação civil mundial, no presente projeto serão adotadas as definições utilizadas pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI ou ICAO, do termo em inglês *International Civil Aviation Organization*), que são também as definições adotadas por diversas autoridades da aviação civil. Atualmente, essa organização adota em suas publicações o termo sistema de aeronaves não tripuladas (UAS) para designar, de forma mais abrangente, os sistemas popularmente conhecidos como *drones*. O termo UAS foi adotado pela ICAO em substituição ao termo Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV), que deixou de ser oficialmente usado pela entidade em 2007.<sup>[29]</sup>

A definição da ICAO para esse tipo de sistema é “uma aeronave e seus elementos associados operados sem nenhum piloto a bordo”, sendo aeronave definida como “qualquer máquina capaz de sustentar-se na atmosfera a partir de reações do ar que não sejam reações do ar contra a superfície da terra”.<sup>[29]</sup> Nesse caso, “elementos associados” são todos aqueles componentes ou subsistemas necessários para operação da Aeronave Não Tripulada (UA, do termo em inglês *Unmanned Aircraft*), que, por sua vez, é apenas a aeronave, sem o piloto a bordo e desconsiderando qualquer um desses elementos associados.<sup>[29]</sup>

Com as definições apresentadas, é possível levantar algumas considerações importantes. Em primeiro lugar, o termo UAS apenas especifica a não existência do piloto a bordo da aeronave. Portanto, são considerados sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS), tanto os sistemas autônomos, isto é, sistemas que atuam de forma completamente independente (em relação a um piloto), quanto sistemas onde a aeronave é monitorada e comandada por um piloto

situado em uma estação remota – ou qualquer combinação entre estas duas categorias. Destaca-se que a referida independência necessária para os sistemas autônomos implica, segundo essa definição, que os pilotos não têm a capacidade de intervir na operação, uma vez iniciado o voo. Dessa forma, os sistemas devem possuir a capacidade, inclusive, de definição de objetivos e tomada de decisões não determinísticas, o que não é esperado para operações em grande escala para um futuro próximo.<sup>[19] [29]</sup>

Portanto, a ICAO define um outro conceito, que leva em conta apenas os Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas que possuem um piloto remoto. Nesse sistemas, é dever do piloto não só pilotar e monitorar, a todo momento, o voo da aeronave, como assumir a responsabilidade pela segurança da operação e ser capaz de responder a instruções dos órgãos de gerenciamento. Para esses sistemas é adotado o termo Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS do termo em inglês *Remotely-Piloted Aircraft System*), definido pela ICAO como “um conjunto de elementos configuráveis formado por aeronave remotamente pilotada, sua(s) estação(ões) remota(s) de pilotagem, os enlaces de comando e controle necessários e quaisquer outros elementos que podem ser requeridos a qualquer momento durante a operação”.<sup>[29]</sup>

Comparando as definições de UAS e RPAS, percebe-se que a última é um subconjunto da primeira, uma vez que é formado por uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA, do termo em inglês *Remotely-Piloted Aircraft*), que nada mais é do que uma subcategoria de aeronave sem nenhum piloto a bordo. Além disso, no caso dos RPAS, dois “elementos associados”, mencionados na definição de UAS são discriminados, ou seja, devem existir, por definição, em todos os sistemas do tipo. O primeiro desses elementos é a estação de pilotagem remota (RPS, do termo em inglês *Remotely-Piloted Station*), que é o sistema que faz a interface entre o piloto remoto e a RPA, permitindo que esse gerencie o voo da aeronave. O outro elemento é o enlace de comando e controle (enlace C2), que é o enlace de dados responsável pela troca de informações entre a RPS e o a RPA.<sup>[29]</sup> Esses três subsistemas estão melhor detalhados na Seção 2.1.2.

Outro subconjunto de UAS estabelecido pela ICAO é o dos aeromodelos. A entidade define aeromodelos como sistemas de aeronaves não tripuladas voltados exclusivamente para fins recreativos.<sup>[30]</sup> Dado seu propósito e histórico de utilização, a ICAO considera que estes não estão sujeitos aos padrões necessários para a harmonização da aviação civil mundial. É importante destacar que os subconjuntos de UAS aqui elencados não são mutuamente exclusivos, ou seja, podem haver interseções em algumas instâncias.<sup>[20]</sup>

Com as definições acima e considerando que um dos principais objetivos desse projeto é compreender o impacto do desempenho humano na pilotagem de UAS em determinadas condições, voltado para a otimização do uso comercial desses sistemas, fica claro que serão abordados nesse estudo apenas os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) para fins não recreativos (*i.e.*, aeromodelos e veículos autônomos estão fora do escopo do projeto). Portanto, nas seções e capítulos subsequentes, o termo mais utilizado para fazer referência aos

tipos de sistemas que são objetos desse estudo é RPAS<sup>a</sup>. Por fim, serão tratados como subsistemas do RPAS os já definidos elementos que o compõe –*i.e.*, a estação de pilotagem remota (RPS), a aeronave remotamente pilotada (RPA) e o enlace de comando e controle (enlace C2). O termo estação de pilotagem de solo (GCS, do termo em inglês *Ground Control Station*) também será utilizado para designar as RPS projetadas para serem operadas em solo.

### 2.1.2 Principais subsistemas

Conforme descrito na Seção 2.1.1, um RPAS é formado por três principais elementos ou subsistemas: uma RPA; uma estação remota de pilotagem (RPS); e o enlace de comunicação entre os dois primeiros (enlace C2). O intuito dessa seção é apresentar um breve descrição de cada um desses sistemas. Por simplicidade, nas subseções referentes a cada um, o termo “sistema” será utilizado para referir-se ao elemento da respectiva subseção (*i.e.*, um dos três subsistemas da RPAS) e o termo subsistema será empregado para se referir aos sistemas que integram cada um desses conjuntos.

#### 2.1.2.1 Aeronave Remotamente Pilotada – RPA

A aeronave remotamente pilotada é a parte do RPAS que efetivamente efetua a missão. Em outras palavras, é a RPA a responsável pelo deslocamento da carga-paga até o local de interesse, cumprindo a missão para qual o sistema foi projetado. Existem diversos tipos de RPAs (*vide* Seção 2.1.3), contudo, em geral, todas elas compartilham de um mesmo conjunto de elementos ou subsistemas básicos.

Um desses subsistemas é o sistema de fornecimento de energia. A grande maioria das RPAs de pequeno e médio porte é alimentada exclusivamente por baterias, porém aeronaves que possuem motores a combustão associados a alternadores elétricos e baterias também são relativamente comuns.<sup>[31]</sup> Outro elemento básico que integra as RPA é o subsistema de propulsão, que é o responsável por propelir a aeronave em voo. Como melhor descrito na seção Seção 2.1.3, as características do subsistema de propulsão de uma RPA é um dos principais fatores que distinguem os diferentes tipos de RPA.

Em RPAs propelidas e sustentadas por um conjunto de rotores e hélices (*i.e.*, multirotores), como é o caso de grande parte dos RPAS de pulverização, por exemplo, o sistemas de propulsão também é o responsável pela atuação (comando de voo), que permite a estabilização e controle do voo, e também é o único responsável pela geração da sustentação, que mantém a RPA no ar. Por outro lado, em aeronaves remotamente pilotadas mais semelhantes aos aviões convencionais (*i.e.*, asas-fixa) o sistema de propulsão é responsável apenas pela geração do empuxo. Em geral, RPAs do tipo multirotor utilizam apenas motores elétricos para a propulsão e atuação, enquanto são encontrados RPAs de asa fixa tanto com motores elétricos quanto a combustão.<sup>[32]</sup>

<sup>a</sup> Mesmo quando o termo UAS for utilizado, será fazendo referência apenas ao subconjunto dos RPAS, a não ser quando explicitamente destacado.

Mais um dos subsistemas básicos da RPA é o dos eletrônicos embarcados, ou seja, o subsistema da aviônica. Esse subsistema é composto, em parte, pelo conjunto de sensores, que são os responsáveis por adquirir os dados relacionados aos parâmetros do voo da aeronave (*e.g.*, velocidade, aceleração, atitude, posição, *etc.*) e ao ambiente externo (*e.g.*, vídeo, presença de outras aeronaves ou obstáculos).

Outro elemento muito comum em RPAs é a presença de um controlador automático que, alimentando-se dos dados dos sensores, é capaz, em alguns casos, não só de prover a estabilização da RPA, mas de comandá-la através de um trajetória previamente planejada a partir de dados provenientes de um *software* de planejamento de missão (consultar Seção 2.1.2.2). Outra função importante geralmente desempenhada pelos sistemas de controle automático dos RPAS é a de constante monitoramento das condições de voo e da saúde do sistema de maneira geral, o que permite a atuação de forma a mitigar riscos envolvendo situações anormais ou de emergência.<sup>[33]</sup>

Por fim, destaca-se o subsistema estrutural, que é muito dependente do tipo e das características do subsistema de propulsão. Isso porque, em multirotores, por exemplo, a característica mais marcante desse tipo de aeronave em termos de arranjo estrutural é a presença de hastes de suportes para cada um dos conjuntos formados por rotores e hélices. Já para os asas-fixas a estrutura é marcada pela asa e por um compartimento central que comporta os demais componentes. Outro aspecto importante do ponto de vista estrutural das RPAs de pequeno porte no geral é que, apesar de algumas apresentarem a estrutura majoritariamente formada por ligas metálicas, o uso de materiais compósitos têm ganhado cada vez mais espaço. Isso ocorre pois, dentre outros fatores, esses materiais apresentam um ótimo desempenho considerando a relação resistência mecânica por unidade de massa do material, alta resistência a fadiga e corrosão, além de um processamento relativamente fácil. Dentro dos materiais compósitos utilizados na estrutura das RPA destaca-se as fibras de carbono (polímero de fibra de carbono reforçado), de vidro e de aramida.<sup>[34] [35]</sup>

#### 2.1.2.2 Estação de Pilotagem Remota – RPS

A estação de pilotagem remota (RPS), ou estação de controle de solo (GCS), é a parcela do RPAS responsável por servir de interface entre o piloto remoto e a aeronave remotamente pilotada. É através dessa estação que são apresentados para o piloto, por meio de telas, todas as informações disponíveis da RPA em voo, provenientes dos sensores e do controlador embarcado – incluindo os possíveis alertas em caso de detecção de condições anormais ou de emergência. Além disso, é através dela que o piloto é capaz de enviar comandos para a RPA. Outra funcionalidade importante normalmente apresentada por GCS de sistemas automáticos é a de permitir o planejamento do voo por meio de ferramentas de planejamento.<sup>[4] [36]</sup>

Da mesma forma que existem inúmeras variedades de aeronaves não tripuladas, as estações e controle de solo também são encontradas em diferentes configurações. Sistemas

voltados para operação dentro da linha da visada do piloto remoto (consultar Seção 2.2.1), normalmente utilizam controles remotos portáteis (para facilitar o deslocamento do piloto, caso necessário) com telas de tamanho relativamente reduzido, uma vez que o piloto não adquire as informações de voo exclusivamente através dessas telas, mas também através da linha de visada direta. Por outro lado, em sistemas que operam além da linha da visada (consultar Seção 2.2.1), o único meio de obter a consciência situacional necessária para a condução segura do voo é através das informações apresentadas em tela para o piloto remoto. Sendo assim, nesse tipo de sistemas, geralmente, as GCS apresentam telas maiores, com mais informações e em estações que permanecem fixas durante a operação.<sup>[36]</sup> As Figuras 4 e 5 apresentam, como exemplo, as estações de controle dos RPAS DJI Agras T30® (um controle remoto portátil) e Hermes 900® (estação fixa com múltiplas telas e mais de um tripulantes).

Figura 4 – Estação de controle do RPAS DJI Agras T30®.



Fonte: DJI<sup>[37]</sup>.

Outro fator que depende muito do tipo de operação do sistema são os tipos de controles apresentados pelas GCS. RPAs onde é desejável uma mudança relativamente rápida na posição da RPA a partir do envio de comandos do piloto remoto, como é o caso de alguns multirrotores de menor porte (usados, inclusive, em competições esportivas<sup>[39]</sup>), é fundamental a presença de controles contínuos lineares (analógicos) como *sticks* movimentados pelos polegares. Já sistemas de maior porte, cujo conceito operacional se aproxima mais daquele das aeronaves tripuladas, geralmente usam controles muito semelhantes aos consolidados na aviação tripuladas – *e.g.*, *joy-sticks* e alavancas de aceleração.<sup>[38]</sup> Por outro lado, sistemas com altos níveis de automatização (*vide* Seção 2.1.3.2) e cujas aplicações não requerem muitas ações por parte do piloto remoto (*e.g.*, mapeamento) podem apresentar apenas botões como controles. Esse é o caso, por exemplo, do RPAS Arator 5C® que é operado a partir de um computador portátil.<sup>[40]</sup>

Figura 5 – Estação de controle do RPAS Hermes 900®.



Fonte: Elbit Systems<sup>[38]</sup>.

Especificamente para o caso de RPAS de pulverização, o conceito operacional desses sistemas (consultar Seção 2.2.5) prevê tanto operações com alto nível de automatização, ou seja, com relativamente poucas ações do piloto (pulverização de grandes áreas), quanto, em algumas casos, operações em que o piloto precisa posicionar manualmente com certa precisão a RPA em determinado ponto ou mesmo realizar manobras para desvio de obstáculos. Por isso, em geral, esses sistemas apresentam controles remotos portáteis com *joysticks*, mas, ao mesmo tempo, telas que permitem a leitura de todas as informações necessárias por parte do piloto e atalhos para acionamento de repostas automatizadas, como é o exemplo do controle do RPAS DJI Agras T30® apresentado na Figura 4.

No que diz respeito as informações apresentadas durante o voo, a maioria das estações possuem um conjunto comum de elementos, dentre os quais destaca-se a presença de um mapa móvel, sobre qual é sobreposto um ícone que representa a posição em tempo real da RPA; um horizonte artificial (indicador de atitude); indicadores de velocidade; um indicador de altitude; um indicador de autonomia (*e.g.*, carga bateria); e indicadores relacionados ao *status* do enlace de comunicação. Além disso, alguns sistemas, principalmente aqueles voltados para operações além da linha da visada do piloto remoto (*vide* Seção 2.2.1), apresentam outras informações, como *status* do sinal da informação de posição, vídeo de câmera frontal, dentre outras. Todas essas informações devem estar devidamente organizadas na tela (ou telas) da RPS de forma a não afetar negativamente a carga de trabalho necessária pelo piloto para a manutenção da segurança da operação.<sup>[36] [41]</sup>

Além dessas informações, como já indicado, outro aspecto comum a diversas RPS é a presença de grupos de alertas, que estão relacionados à detecção, por parte do controlador automático, de condições potencialmente inseguras. A depender do nível de automatização do sistema (*vide* Seção 2.1.3.2) e do tipo de condição detectada, cada alerta pode ou não requerer a

atuação do piloto remoto, uma vez que alguns sistemas apresentam respostas automáticas para o contingenciamento de situações de risco.

A possibilidade de planejamento do voo a ser realizado automaticamente também é uma funcionalidade fundamental geralmente apresentada pelas estações de controle. O planejamento é possível graças a um conjunto de ferramentas apresentadas por um *software* de planejamento de voo normalmente instalado na RPS. Com essas ferramentas, o usuário pode, antes do início do voo, por exemplo, definir a trajetória desejada para missão a partir da inserção de *waypoints* em uma mapa; delimitar a área autorizada para voo; checar se todos os pontos do voo estão dentro das limitações de desempenho do sistema; definir áreas de pouso de emergência (caso aplicável), dentre outros. Muitos *softwares* de planejamento são capazes, inclusive, de gerar automaticamente as rotas mais otimizadas para voo a partir de poucos dados de entrada fornecidos pelo usuário. Após o planejamento, a missão é então transferida para a RPA, que a executa conforme determinado.<sup>[36] [41]</sup>

Existem, hoje, diversos *softwares* de RPS disponíveis no mercado. *Softwares* de código aberto como o *Mission Planner*<sup>[42]</sup> e o *QGroundControl*<sup>[43]</sup>, que integram tanto as ferramentas de planejamento quanto os *software* de voo (*i.e.*, instrumentos e comandos) são exemplos disponíveis hoje para desenvolvedores de aplicações envolvendo sistemas não tripulados.

### 2.1.2.3 Enlace de Comando e Controle – Enlace C2

Um aspecto fundamental dos sistemas de aeronaves remotamente pilotadas é o fato de o piloto, durante a operação, localizar-se distante da aeronave. Dessa forma, um enlace que garanta a comunicação, de forma confiável e eficiente, entre o piloto remoto, que atua na RPS (Seção 2.1.2.2), e a RPA (Seção 2.1.2.1) é sempre requerido para garantir a segurança geral da operação. Esse enlace de comunicação, conhecido como enlace de comando e controle ou apenas enlace C2, é estabelecido por meio do uso de radiofrequências.<sup>[44]</sup>

O enlace C2, de maneira geral, pode ser de dois tipos: criados através de um *link* direto de rádio entre a RPA e a RPS; ou utilizando equipamentos de comunicação intermediários entre esses dois sistemas para estabelecer o enlace. Os enlaces do primeiro tipo são conhecidos como enlaces dentro da linha de visada de rádio (RLOS, do termo em inglês *radio line-of-sight*), enquanto os do segundo tipo são chamados de enlaces além da linha de visada de rádio (BRLOS, do inglês *beyond radio line-of sight*).<sup>[30] [45]</sup>

Enlaces do tipo RLOS são caracterizados justamente pelo fato de que ambos os transmissores e receptores estão dentro do alcance de comunicação um do outro e, portanto, são capazes de se comunicar diretamente. De forma geral, a maioria das operações com RPAS de uso civil na atualidade, incluindo as de sistemas especializados, se baseiam em enlaces do tipo RLOS. Dentro desse tipo de enlace, têm destaque os equipamentos que se utilizam da banda de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*), reservadas internacionalmente para o desenvolvimento dos setores industrial, científico e médico. Uma das faixas de frequência, dentro da banda ISM,

mais utilizadas para esse tipo de aplicação é a faixa próxima à frequência  $2.4\text{ GHz}$ , mesma banda utilizada, por exemplo, em algumas das tecnologias de transmissão de dados sem fio mais difundidos e utilizados no mundo, como os baseados no padrão IEE 802.11 (*e.g.*, Wi-Fi) e o *Bluetooth*.<sup>[30] [45] [4]</sup>

Um fator que limita o alcance dos sistemas de comunicação baseados nessas frequências são as limitações regulamentares aos equipamentos de comunicação que operam nessas faixas, que não podem, por exemplo, emitir potências muito altas. Além disso, soluções já empregadas em outros tipos de tecnologias voltadas para aumentar o desempenho dos sistemas de comunicação não podem ser usadas devido às limitações de tamanho e peso das RPA de pequeno porte. Por fim, a necessidade de uma enlace direto entre os transceptores também gera limitações tanto em termos de alcance (limitadas pelas áreas de coberturas dos respectivos equipamentos), quanto de áreas de operação, uma vez que a presença de obstáculos na linha de visada de rádio é extremamente prejudicial à troca de informações.<sup>[44] [45]</sup>

Por outro lado, os enlaces do tipo BRLOS, apesar de apresentarem o potencial para superar muitas das limitações relacionadas aos sistemas RLOS, ainda não são muito acessíveis para aplicação em RPAS de pequeno e médio porte. Dentre as tecnologias utilizadas em sistemas de comunicação BRLOS, destacam-se as baseadas em comunicações *via* satélite e as que utilizam a rede de telefonia móvel de celular – como a emergente tecnologia 5G. Essas tecnologias, contudo, ainda possuem alguns desafios a serem vencidos antes de se estabelecerem no setor dos RPAS. Dentre esses desafios citam-se as questões relacionadas a infraestrutura necessária (*i.e.*, constelações de satélites, no caso dos sistemas satelitais, e antenas de transmissão no caso da rede de telefonia móvel), ao gerenciamento do uso das bandas de frequência (considerando o número de usuários esperado) e ao tempo adicional de troca de dados (latências) devido à inclusão, na arquitetura de comunicação, de pontos intermediários.<sup>[44] [45]</sup>

### 2.1.3 Tipos de RPAS

Dada a grande variedade de características dos sistemas de aeronave remotamente pilotadas encontradas atualmente no meio civil, são diversos, também, os critérios utilizados para classificá-los, a depender do interesse do agrupamento. Massa, tipo de sistemas de propulsão e geração de sustentação e grau de automatização são apenas alguns dos critérios utilizados para a classificação. As subseções a seguir apresentam algumas das principais classificações dos RPAS, considerando o escopo desse projeto.

#### 2.1.3.1 Geração de sustentação

Uma característica dos sistemas de aeronaves remotamente pilotadas muito utilizada para agrupamento em classes (ou tipos) é a forma principal com que a aeronave do sistema

gera sustentação<sup>b</sup>. Esse critério de agrupamento é muito útil, pois RPAs com uma mesma configuração, isto é, que geram sustentação a partir de um mesmo princípio, normalmente também apresentam características operacionais e de projeto muito semelhantes.<sup>[1]</sup> São diversos os grupos que podem ser atualmente encontrados considerando este critério, contudo, no mercado atual da aviação civil não tripulada, dois tipos de RPAS ganham destaque pelo grande número de modelos encontrados. São eles os RPAS com RPA multirotores e os RPAS com RPA asa-fixa<sup>c</sup>.

#### 2.1.3.1.1 RPAS asa-fixa

Os sistemas chamados asa-fixa são aqueles nos quais a aeronave gera sustentação a partir de uma ou mais estruturas aerodinâmicas (asas) fixas e estáticas.<sup>[1]</sup> Nesse caso, a geração de sustentação se dá pelo movimento da aeronave em relação à massa de ar, propelida por um ou mais conjuntos moto-propulsores que criam empuxo na direção do eixo longitudinal da aeronave e no sentido do nariz para a região traseira do veículo. Assim, é criado um fluxo de ar na asa (escoamento) que gera o gradiente de pressão que tem como consequência a força aerodinâmica. Este é o mesmo princípio utilizado pelos aviões tripulados convencionais, sendo essa, inclusive, a característica que distingue esse conjunto.<sup>[47]</sup> Os sistemas não tripulados do tipo asa-fixa dominaram os primeiros desenvolvimentos do tipo, ainda quando essa tecnologia era predominante no meio militar.<sup>[2]</sup>

As RPA desses sistemas, quando comparadas às de outros tipos, de maneira geral, possuem uma melhor eficiência em termos de consumo por tempo de operação e distância percorrida. Isso faz com que apresentem uma autonomia consideravelmente maior, quando comparados a sistemas de outros tipos e massas similares. Isso ocorre, pois, além da própria eficiência aerodinâmica da configuração, normalmente as aeronaves asa-fixa podem ser equipadas com motores a combustão, que apresentam, de maneira geral, uma eficiência melhor do que outros tipos de motores com especificações semelhantes (considerando as tecnologias mais difundidas atualmente). Outro fator importante é a velocidade de voo: sistemas asa-fixa normalmente são mais velozes que os sistemas equivalente de outros tipos. Esses fatores os tornam ideais para missões em que é necessário a cobertura de grandes distâncias ou grandes áreas e também para quando há a necessidade de tempo de descolamento mais curto.<sup>[4] [31] [48]</sup>

Outro fator marcante da classe é a incapacidade de decolagem vertical. Uma vez que a geração de sustentação depende da fluxo de escoamento nas asa, para iniciar o voo o veículo necessita de uma certa velocidade inicial. O problema inverso ocorre para o pouso, uma vez que a aeronave necessita de manter uma velocidade mínima para se manter no ar até o último instante. Dessa forma, a não ser para sistemas de porte muito pequenos, o sistema requer uma certa

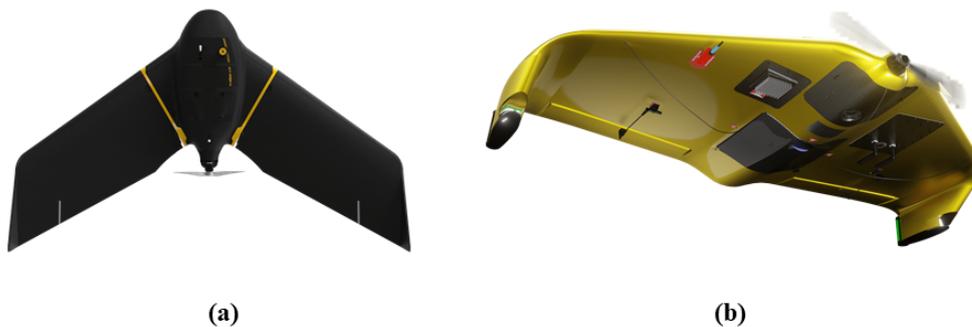
<sup>b</sup> Sustentação, nesse caso, se refere a componente transversal ao escoamento da força gerada a partir de reações de superfícies aerodinâmicas com o ar e responsável por colocar e manter a aeronave em voo.<sup>[46]</sup>

<sup>c</sup> Daqui em diante referidos apenas como RPAS multirotores e RPAS asa-fixa, respectivamente, por simplicidade.

infraestrutura adicional de decolagem e pouso – *e.g.*, pista, catapultas, paraquedas e sistemas de captura.<sup>[4]</sup>

Hoje, os RPAS asa-fixa são encontrados nas mais diversas configurações e dimensões. Dentre os RPAS asa-fixa de menor porte, são exemplos os sistemas de para mapeamento SenseFly Ebee X® (Figura 6a) e Xmobots Arator 5C® (Figura 6b). Em ambos os casos as RPAs são asas voadoras com menos de 5 *kg* de MTOM (1,7 *kg* para a RPA do Ebee X® e 3,6 *kg* para o Arator 5C®), propelidas por motores elétricos e projetados para serem lançados a mão. No caso do Ebee®, a aeronave possui uma envergadura de 1,16 *m* e o procedimento de terminação normal de voo é o pouso de barriga. O Arator 5C® possui uma envergadura de 1,2 *m* e o procedimento de terminação normal de voo é pela abertura do paraquedas.<sup>[16]</sup>

Figura 6 – RPAs asa-fixa de uso civil de mapeamento (a) SenseFly Ebee X®; (b) Xmobots Arator 5C®.



Fonte: Xmotots<sup>[40]</sup> e SenseFly<sup>[49]</sup>

#### 2.1.3.1.2 RPAS multirotor

Sistemas multirotores são uma classe especial de aeronaves de asa rotativa, isto é, aeronaves motorizadas mais pesadas que o ar onde a sustentação é gerada primordialmente a partir da reação do ar em um ou mais rotores. Nesse caso, a especificidade da classe dos multirotores é justamente a necessária existência de mais de um rotor na geração de sustentação. Dessa forma, em outras palavras, multirotores são as aeronaves e, no caso particular dos RPAS, as aeronaves não tripuladas, que se mantêm em voo a partir da sustentação gerada pelo movimento de vários rotores e suas respectivas pás.<sup>[30] [1]</sup>

Os multirotores, não tão comuns em aeronaves tripuladas, têm se tornado cada vez mais populares nos sistemas não tripulados, principalmente os de pequeno porte. São diversas as razões encontradas para a disseminação desse tipo de configuração, destacando-se, por exemplo, a evolução dos controladores automáticos, que se tornaram muito mais acessíveis e confiáveis, e das tecnologias de armazenamento de energia elétrica (baterias), principalmente em termos

da relação carga armazenada por peso. Esse conjunto de fatores fez com que fosse possível o desenvolvimento de sistemas muito confiáveis, de custo relativamente baixo e com ótimo desempenho para determinadas aplicações.<sup>[1] [41]</sup>

Conforme já mencionado na Seção 2.1.2.1, nos RPAS multirotores, a função de acionamento (ou comando de voo), isto é, de execução das ações necessárias para controlar o voo da aeronave, é realizada pelo conjunto de rotores e pás, que também é responsável pela propulsão da aeronave e pela geração de sustentação. Assim, de forma simplificada, as funções desempenhadas pelos sistemas de comando de voo, propulsão e de geração de sustentação das aeronaves asa-fixa convencionais são desempenhadas por um único sistema nos multirotores, formado pelo conjunto dos rotores, controladores e pás.

De forma geral, a estabilização em voo da RPA é feito através de variações dos empuxos gerados por cada um dos rotores – a geração desigual de empuxo nos diferentes eixos é capaz de controlar a posição e a velocidade da RPA. A necessidade de variações rápidas no empuxo (para a estabilização) faz com que sejam utilizados apenas motores elétricos nessas aeronaves. Nesse tipo de motor, o torque é gerado de forma proporcional a voltagem alimentada, o que permite o controle da RPA através do envios de sinais elétricos. Isso, somado à própria dinâmica de voo dessa configuração (menor eficiência em termos de aerodinâmica quando comparado a outros tipos de sistemas) e as limitações atuais das tecnologias de armazenamento de energia elétrica (*i.e.*, baterias), faz com que os multirotores sejam caracterizados pela baixa autonomia e pelas baixas velocidades de deslocamento.<sup>[1] [48] [32] [50]</sup>

Outra consequência desse tipo de sistema de controle de voo é a necessidade de controladores automáticos capazes de realizar a estabilização da aeronave, uma vez que a tarefa de variar os empuxos gerados pelos diversos conjuntos de rotores de forma desigual e simultânea, para controlar a atitude, posição e aceleração da RPA, é incompatível com a capacidade de pilotagem humana.<sup>[50]</sup> Atualmente, os multirotores disponíveis no mercado já permitem um controle de posição com uma precisão muito alta, sendo capazes de se manter estabilizados em pontos no ar conforme o interesse do piloto. Essa capacidade torna esse tipo de sistema ideal para filmagens, mapeamentos de áreas e aplicações de produtos em locais específicos (*e.g.*, catação para combate de ervas daninhas em lavouras)<sup>[1]</sup>

As limitações nos sistemas de armazenamento de energia também restringem muito a disseminação de modelos de RPAS de grande porte. Contudo, a evolução dos últimos anos nesse tipo de tecnologia tem sido contundente. Por esse motivo, novas aplicações, que envolvem, necessariamente, RPAs de maior porte, têm surgido para os sistemas multirotores sem piloto a bordo. Esse é o caso, por exemplo, do uso para transporte de pessoas e pulverização em área total de lavouras (consultar Seção 2.2.5).<sup>[1] [11]</sup>

Dentre os multirotores civis de menor porte, destacam-se os sistemas da fabricante chinesa SZ DJI Technology Co., Ltd., que dominam esse mercado em nível global.<sup>[51]</sup> Sistemas como o Phantom 4® (Figura 2), o Mavic Air 2® (Figura 7) e o Mini 2® são quadricópteros

(i.e., possuem 4 conjuntos de rotores e hélices) com câmeras embarcadas, controlados através de controles remotos e muito utilizados para cinematografia, fotografias e inspeções, dentre outras aplicações. Esses sistemas são caracterizados pelo curto alcance e baixa autonomia.

Figura 7 – Sistema DJI Mavic Air 2® formado por: (a) Aeronave Remotamente Pilotada; e (b) Controle Remoto.



Fonte: DJI<sup>[52]</sup>.

Passando para sistemas de porte um pouco maior, cita-se o pulverizador Agravas T30® (Figura 8), também da fabricante DJI. A RPA desse sistema trata-se de um hexacóptero com massa máxima de decolagem de 76,5 kg e com uma capacidade de carga de até 30 kg de defensivo. A máxima dimensão dessa aeronave é aproximadamente 2,8 m, sendo sistema totalmente elétrico (alimentado por baterias). Assim como os sistemas de menor porte citados, a estação de controle (GCS) desse RPAS é um controle remoto portátil, que se comunica com a RPA através de um *link* direto de rádio. O sistema é projetado para que a RPA possa voar em baixas velocidades sobre lavouras, aplicando agrotóxicos (armazenados em um tanque).<sup>[37]</sup>

Figura 8 – RPA pulverizador Agravas T30® da fabricante DJI.



Fonte: DJI<sup>[37]</sup>.

Destaca-se que, não só o exemplo citado acima, mas, no geral, as RPA dos RPAS de

pulverização são multirotores. Isso se dá pois, nesse tipo de aplicação, é de muito interesse um controle preciso de posição, além da possibilidade de realização de voos em baixas velocidades e baixas alturas – elementos fundamentais para garantia da eficiência de operações de pulverização e características de *drones* multirotores (consultar Seção 2.2.5).

#### 2.1.3.1.3 Outras classes de sistemas

Além das classes mais convencionais, isto é, os multirotores e asas-fixas, existem outros tipos menos comuns de RPAS no que diz respeito ao princípio de geração de sustentação. Dentre esses sistemas, estão, por exemplo, os chamados ornitópteros, que são sistemas cujas RPAs geram sustentação e propulsão a partir de movimentos oscilatórios de suas asas, semelhante ao mecanismo utilizado por aves e insetos. Nesse grupo estão também os balões não tripulados.<sup>[1]</sup>

Outros tipo de sistema que vem ganhando muita notoriedade no mercado civil atual são os asas-fixas VTOL<sup>d</sup>, que são sistemas cujas RPA utilizam tanto um conjunto rotores quanto asas fixas para a geração de sustentação, a depender da fase de voo. Nesse caso, o intuito é obter um sistema híbrido que aproveite as principais vantagens de ambas os tipos de RPAS, Notadamente, os sistemas híbridos desse tipo geralmente apresentam uma autonomia consideravelmente maior do que os multirotores tradicionais (característica derivada do uso de asas fixas para a geração de sustentação durante as fases de maior deslocamento) sem a necessidade de infraestrutura ou mecanismos especiais para a decolagem e pouso, uma vez que o conjunto de rotores permite a decolagem e pouso verticais.<sup>[1] [4]</sup> Um exemplo desse tipo de sistema é o Penguin C VTOL UAS da fabricante UAV Factory (Figura 9).

Figura 9 – Aeronave híbrida Penguin C VTOL UAS.



Fonte: UAV Factory<sup>[53]</sup>.

<sup>d</sup> Sistemas VTOL são sistemas capazes de pousar e decolar verticalmente. A sigla VTOL é derivada do termo em inglês *Vertical Takeoff and Landing*.

### 2.1.3.2 Níveis de automatização

A automatização está ligada à capacidade de um sistema (máquina) de desempenhar tarefas que, em outros casos, necessitariam de ser executadas por seres humanos. Ao contrário da automação <sup>e</sup>, que, de forma muito simplificada, envolve necessariamente a capacidade de tomada de decisão por parte do sistema com relação a que ação executar, baseando-se em conhecimentos previamente adquiridos e na percepção própria da situação, permitindo, inclusive, desvios de padrões (processo não determinístico); a automatização está ligada a ação com base em uma série de regras bem definidas e que não permitem desvios.<sup>[19]</sup>

Especificamente tratando de classificação de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas quanto aos seus níveis de automatização, as tarefas (ou funções) automatizáveis de maior interesse para o agrupamento são as funções de controle, navegação e guiamento. Isto é, os grupos de RPAS são formados considerando se o sistema é ou não capaz de desempenhar uma ou mais dessas três funções de forma automatizada.

Nesse sentido, é importante estabelecer o que é cada uma dessas três funções. Em primeiro lugar, neste trabalho, considera-se a função de controlar a aeronave (*i.e.*, função controle), como a função responsável por estabilizar o veículo em voo e permitir que o mesmo siga uma determinada trajetória. O controle da aeronave é feito através do envio de comandos para as superfícies de controle, que, ao reagirem com o escoamento, criam as forças necessárias para desempenhar essa função.

A determinação da trajetória desejada a partir da posição atual até um ponto futuro de interesse, por sua vez, é a função conhecida como guiamento. Nesse caso, a trajetória envolve não só a mudança de localização do veículo, mas também a aceleração e velocidade desejadas ao longo da trajetória. Por fim, a função de navegação envolve a determinação da posição e da velocidade do veículo em relação ao espaço. Em outras palavras, a navegação determina a posição da aeronave e a localização desta em relação a um ponto de interesse. Com essa informação, o guiamento estabelece uma trajetória para que a aeronave se desloque até esse ponto e o controle garante que esse deslocamento seja possível.<sup>[33]</sup>

Nesse contexto, são três os grupos principais de RPAS que se destacam no meio civil atual. Em primeiro lugar, cita-se os sistemas que necessitam, a todo momento, de um piloto remoto para exercer as funções de navegação e guiamento, a não ser em casos anormais ou de emergência relacionados à perda do enlace de comunicações – nesses casos, é possível que as aeronaves sigam uma rota previamente definida para tentar retomar a comunicação com o piloto.<sup>[1]</sup> Exemplos desses tipo de sistemas são os multirotores de menor porte citados na Seção 2.1.3.1.2 e diversos sistemas voltados para recreação. As aeronaves desses RPAS são, em muitos casos, comandados através de um controle remoto portátil e permanecem próximas ao piloto remoto, de forma que este é capaz de visualizar diretamente a RPA e o ambiente ao seu

---

<sup>e</sup> Sistemas autônomos estão fora do escopo desse trabalho.

redor. Nesses casos, a RPA tem a função de controle automatizada, cabendo ao piloto comandar a altitude, posição e velocidade de deslocamento da aeronave, conforme desejável.

O outro grupo é composto pelos sistemas com a capacidade de automatizar não só a função de controle, mas também as funções de guiamento e navegação – sistemas automáticos. Esse é o caso, normalmente, de sistemas cuja aplicação envolve a cobertura de grandes áreas ou que necessitam de muita precisão – *e.g.*, RPAS de mapeamento e pulverização.<sup>[1]</sup> Nesses casos, no voo conhecido como automático (*i.e.*, onde as funções de navegação e guiamento são automatizadas), a RPA segue uma rota predeterminada pelo piloto durante o planejamento do voo. Em outras palavras, a RPA realiza todo o voo sem a necessidade de interferência do piloto remoto (a não ser em casos anormais ou de emergência), que apenas monitora o voo e as condições ao redor da aeronave através da linha de visada direta ou através das informações enviadas pela RPA e disponíveis na estação de solo. Esse é o tipo de sistemas utilizado em operações em que um piloto é responsável por mais de uma RPA simultaneamente – é justamente a automatização das funções de controle, guiamento e navegação que permite que o piloto possa ser responsável por mais de uma RPA, uma vez que o piloto não necessita ter toda sua atenção voltada para o controle ativo das aeronaves a todo momento.

Ainda nesse grupo, destaca-se que muitos dos *softwares* para o planejamento da missão contam ainda com diversas funcionalidades para facilitar e tornar mais seguro o processo de determinação da trajetória de voo, dentre as quais cita-se: impedimento de iniciar voos não compatíveis com as características de desempenho da RPA; cálculo automático da trajetória ideal com base na área de interesse; e interface gráfica com mapa para facilitar a orientação durante o planejamento, *etc.*<sup>[41]</sup> <sup>[36]</sup> Por fim, vale destacar que, em muitos casos, esses sistemas também contam com modos de voo que permitem ao piloto remoto assumir o controle das funções de guiamento e navegação.

Por fim, tem-se o grupo dos RPAS onde todas as três funções (controle, navegação e guiamento) ficam a cargo do piloto remoto. Como já referido na Seção 2.1.3.1.2, essa classe do sistema não é aplicável para os RPAS multirotores atuais. Mesmo nos RPAS asa-fixa (consultar Seção 2.1.3.1.1) ou sistemas com geração de sustentação híbrida (consultar Seção 2.1.3.1.3) esse tipo de sistema é pouco usado, considerando a maior dificuldade para o piloto remoto – principalmente quando a aeronave está além do alcance de sua visão. Esse grupo de sistemas, contudo, ainda é bastante usado para recreação, principalmente em aeromodelos.

## 2.2 Operações de RPAS

O objetivo dessa seção é apresentar alguns dos principais conceitos relacionados à operações com sistemas de aeronaves remotamente pilotados (RPAS). Além disso, serão descritos as principais características da operação de um RPAS de pulverização de lavouras típico, que são o foco desse estudo.

### 2.2.1 Tipos de operação de RPAS com base na linha de visada

Um critério muito utilizado para classificação das operações com RPAS é o meio primário de aquisição de informações relacionadas ao voo da RPA pelo piloto. De forma geral, segundo esse critério, as operações de RPAS são classificadas em três tipos: operações dentro da linha de visada visual ou direta (VLOS, do termo em inglês *visual line-of-sight*); operações em linha de visada visual estendida (EVLOS, do termo em inglês *extended visual line-of-sight*); e operações além da linha da visada visual (BVLOS, do termo em inglês *beyond visual line-of-sight*).<sup>[30]</sup>

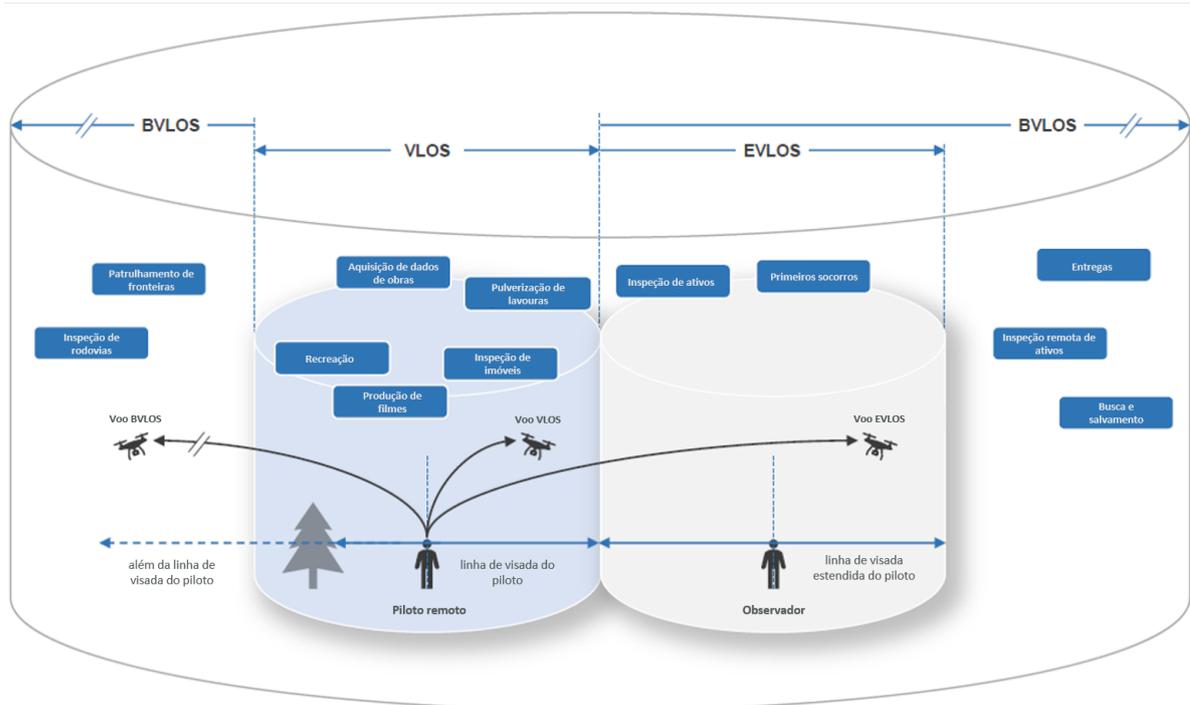
De maneira mais específica, operações dentro da linha da visada visual ou, por simplificação, operações VLOS, são definidas como aquelas operações nas quais o piloto remoto é capaz de manter, a todo momento durante o voo, contato visual direto (*i.e.*, sem auxílio de equipamentos ou lentes que não sejam corretivas) com a RPA. Dessa forma, é esperado que, nas operações VLOS, o piloto remoto seja capaz de determinar visualmente todas as informações necessárias para a manutenção da segurança do voo, tanto do ponto de vista das condições e trajetória de voo da aeronave, quanto para evitar possíveis colisões com outras aeronaves, pessoas e demais obstáculos.<sup>[30] [54]</sup> Uma vez que esse tipo de operação está necessariamente atrelada ao alcance visual dos seres humanos e considerando que aeronaves remotamente pilotadas de pequeno porte possuem dimensões relativamente pequenas (quando comparadas a aviões tripulados), fica claro que operações VLOS só podem ocorrer com um alcance limitado.

Operações em linha de visada visual estendida, ou operações EVLOS, são aquelas nas quais o piloto remoto toma consciência das condições de voo da aeronave e do ambiente ao seu redor a partir de observadores visuais. Ou seja, nesse tipo de operação, apesar de o piloto remoto não necessariamente estar, a todo momento, com a RPA dentro da sua linha de visada, ele estará recebendo as informações necessárias para a manutenção da segurança de voo de uma ou mais pessoas (observadores) que conseguem ver a aeronave. Operações EVLOS, portanto, podem ser realizadas com alcances maiores quando comparado a operações VLOS. Esse tipo de operação, contudo, exige um sistema seguro e eficiente de comunicação entre o piloto remoto e um ou mais observadores, além de necessitar de mais pessoas para que possa ocorrer, o que pode ser uma desvantagem em termos de eficiência operacional. É importante mencionar que algumas entidades, como a própria ICAO, consideram as operações EVLOS como uma subcategoria das operações VLOS, uma vez que a forma principal de aquisição de consciência situacional é a mesma (contato visual direto).<sup>[30]</sup>

Operações além da linha da visada, ou apenas operações BVLOS, por outro lado, são aquelas nas quais o piloto remoto só é capaz de adquirir consciência das condições de voo da RPA e do ambiente ao seu redor através de informações enviadas pela própria RPA, captadas pelos diversos sensores embarcados. O alcance desse tipo de operação é, portanto, limitado apenas pelas capacidades do RPAS (*e.g.*, autonomia ou alcance de comunicação), o que permite operações com alcances consideravelmente maiores dos que em condições VLOS. O fato de o piloto não avistar o veículo e o ambiente de voo, contudo, traz uma série de novas dificuldades à operação.

É preciso garantir, por exemplo, que o sistema seja capaz de detectar e informar ao piloto remoto, de forma clara, confiável e em tempo hábil para sua atuação, em caso de necessidade, a presença de obstáculos ou outras possíveis ameaças à segurança do voo.<sup>[30] [54] [14]</sup> A Figura 10 a seguir apresenta uma representação esquemática dos três tipos de operações mencionados – na imagem estão também destacadas algumas aplicações de interesse para cada tipo de operação.

Figura 10 – Tipos de operações de RPAS e aplicações relacionadas.



Fonte: Adaptado de Droneii<sup>[51]</sup>.

### 2.2.2 Pessoas envolvidas e requisitos de treinamento

A ICAO, assim como as autoridades da aviação civil brasileira (*i.e.*, ANAC e DECEA), definem alguns conceitos relacionados à pessoas envolvidas na operação de RPAS para facilitar a atribuição de papéis e responsabilidades na operação.<sup>[30] [14] [28]</sup> Em primeiro lugar, o operador de um RPAS pode ser definido como uma pessoa ou organização que explora ou pretende explorar os serviços de um RPAS de forma legítima, com ou sem fins lucrativos. Já o piloto remoto é definido como uma ou mais pessoas designadas pelo operador como responsáveis por manipular os controles de voo, conforme aplicável, durante o voo da RPA. O piloto remoto em comando ou simplesmente piloto em comando (PIC, do termo em inglês *pilot-in-command*), por sua vez, é o piloto designado pelo operador como responsável pela segurança global do voo, não necessariamente atuando no comando da RPA. É o PIC quem tem a autoridade final durante a operação. Por fim, o observador de RPA, como já destacado na Seção 2.2.1, pode ser definido como uma ou mais pessoas que auxiliam o piloto durante o voo através da observação direta<sup>f</sup> da

<sup>f</sup> Sem o auxílio de equipamento ou lentes, exceto lentes corretivas.

RPA, transmitindo ao piloto remoto as informações necessárias para a manutenção da segurança do voo.<sup>[28] [30]</sup>

Algumas operações mais simples ou envolvendo RPAS com alto nível de automatização podem ser conduzidas por uma única pessoa com um nível de segurança aceitável. Nesses casos, uma única pessoa assume os papéis tanto de piloto remoto quanto de PIC. Operações mais complexas, por outro lado, geralmente possuem um número maior de pessoas envolvidas. Há, por exemplo, o caso das operações EVLOS que, por definição, contam com a presença de pelo menos um observador de RPA. Outro exemplo são as operações de RPAs que necessitam de intervenções de um piloto remoto para completar procedimentos de pouso e decolagem mas que, nas demais fases de voo, são comandadas por outro piloto a partir de uma estação de controle que recebe dados de voo. Nesses casos, um piloto remoto é necessário próximo à pista, mantendo contato visual direto com a RPA e enviando comandos de correção de trajetória, conforme necessário.<sup>[30]</sup> Esse é o tipo de operação, por exemplo, do sistema SPECTRA® da fabricante ARYS Tecnologia Embarcada Ltda.<sup>[55]</sup>

Em termos que requisitos de treinamento e, de forma mais ampla, de qualificação necessária para operação de sistemas não tripulados, a ICAO estabelece que todos os participantes da operação que têm alguma responsabilidade sobre a manutenção da segurança do voo devem conhecer, estar treinados, ter experiência e ser qualificados para suas tarefas.<sup>[30]</sup> Contudo, considerando a relativa simplicidade de operação de grande parte dos sistemas em operação na atualidade, assim como os tipos de operação menos complexos (*i.e.*, operações VLOS em baixas altitudes), a maioria das operações conduzidas atualmente não exige que os pilotos ou outros membros da tripulação passem por nenhum tipo de treinamento especializado, como acontece na aviação tripulada. Mesmo em casos em que há uma exigência de treinamento, este busca apenas garantir que o piloto conheça alguns conceitos básicos da operação de sistemas remotamente tripulados e da regulamentação vigente. Dessa forma, grande parte das operações de RPAS envolve apenas uma familiarização do piloto com o equipamento e, algumas vezes, um treinamento oferecido pelo próprio fabricante.<sup>[56] [14] [54]</sup>

Operações mais complexas e com um nível de risco mais alto (consultar Seção 2.2.4), como operações em espaço aéreo mais congestionados, normalmente, exigem que os pilotos possuam uma licença para poderem realizá-las. A ANAC, por exemplo, exige que todas operações acima de 400 *ft* ou com sistemas com mais de 25 *kg*, exceto aqueles voltados para pulverização de lavouras, sejam conduzidas por pilotos devidamente licenciados.<sup>[14]</sup>

### 2.2.3 Volumes operacionais

O termo “volume operacional” é utilizado aqui para designar a porção do espaço formada pelo espaço aéreo reservado para voo (incluindo zonas de segurança), a área em solo logo abaixo desse espaço aéreo e quaisquer outras áreas necessárias para a operação do RPAS – *e.g.*, área reservada para a GCS e área necessária para pouso e decolagem.

A grande maioria das operações de RPAS da atualidade são conduzidas em altitudes muito baixas, isto é, abaixo de 400 *ft*. Além disso, limitações impostas pelas regulamentações dificultam operações próximas a aeródromos, sobre áreas povoadas ou em espaços aéreos condicionados.<sup>[28] [54]</sup> Assim, aplicações cujas operações podem ser conduzidas longe de outros usuários do espaço aéreo, em áreas esparsamente povoadas ou locais reservados e em espaços aéreos não condicionados são as mais favorecidas – como é o caso das operações de pulverização. Além disso, considerando as já referidas limitações no alcance das operações (consultar Seções 2.1.2.3 e 2.2.1), os volumes operacionais ficam, muitas vezes, limitados ao menor entre o alcance da visada do piloto (operações VLOS) ou ao alcance da comunicação (sistemas RLOS).

Operadores que pretendem utilizar seus sistemas em condições diferentes das anteriormente citadas, no geral, devem conseguir autorizações específicas para tanto. Essas autorizações, muitas vezes, exigem que medidas especiais de segurança sejam tomadas, como a segregação do espaço aéreo – isto é, a reserva do volume operacional de forma que o único a ocupá-lo durante o voo seja o requerente da solicitação.<sup>[20] [28]</sup> Contudo, o rápido avanço do número de sistemas e o grande interesse dos mais diferentes setores no uso em grandes escalas dessa tecnologia já pressionam para que outros tipos de volumes operacionais possam ser ocupados pelos sistemas não tripulados sem a necessidade de processos e análises muito específicas e onerosas.<sup>[1]</sup>

#### 2.2.4 Considerações sobre risco nas operações de RPAS

O conceito de risco, no contexto de sistemas aeronáuticos, está associado a uma avaliação da gravidade de potenciais situações de perigo que podem ocorrer durante determinada operação. Essa avaliação é feita em termos da potencial severidade das consequências dessa situação e da probabilidade de sua ocorrência. Severidade, nesse caso, é o impacto da consequência da situação de perigo em termos de perdas ou danos (*e.g.*, material, financeiro, físico, *etc.*), considerando a pior consequência razoavelmente esperada. O nível de risco de uma operação de RPAS, portanto, é uma composição da severidade das possíveis consequências das situações de perigo que podem aparecer durante essa operação com a probabilidade dessas situações ocorrerem. Uma operação na qual é alta a probabilidade de ocorrência de uma situação de perigo que tenham um impacto grande em termos de perdas ou danos, dessa forma, é uma operação de alto risco.

Do ponto de vista das operações de RPAS, para a avaliação dessa severidade, as principais consequências com as quais, no geral, os órgãos reguladores estão preocupadas são: a ocorrência de uma fatalidade ou dano a uma propriedade no solo e a colisão com outro usuário do espaço aéreo.<sup>[54]</sup> Assim, simplificadamente, uma operação com um nível de segurança adequado (*i.e.*, com baixo risco) é aquela em que a probabilidade da ocorrência de qualquer situação que possa levar alguma dessas consequências é relativamente baixa.

Nesse contexto, alguns dos principais fatores que afetam o nível de risco da operação são: o tamanho e o peso da aeronave, que influenciam na chance de uma fatalidade ou dano a propriedade em caso de queda; a altitude a ser voada e a classificação do espaço aéreo a ser

utilizado, que influenciam na probabilidade de colisão com outros usuários do espaço aéreo; a área a ser sobrevoada (próximo a infraestruturas críticas ou a locais movimentados, por exemplo) e o período da operação (noturno ou diurno, por exemplo), que influenciam na possibilidade de alguma pessoa ou propriedade serem afetadas; o tipo de operação (BVLOS, VLOS ou EVLOS) e a complexidade das tarefas a serem executadas pelo piloto remoto (operações onde um piloto remoto comanda várias RPA, por exemplo, têm uma complexidade relativamente mais alta, uma vez que o piloto deve dividir sua atenção entre as aeronaves), que aumentam a chance de acidentes.<sup>[54] [57]</sup>

Dessa forma fica claro que operações conduzidas em ambientes operacionais extremamente seguros e controlados (*e.g.*, espaço aéreo segregado e áreas esparsamente povoadas) apresentam um risco intrínseco menor do que operações a serem conduzidas em locais movimentados e em espaço aéreo compartilhado.<sup>[54]</sup> Outro fator crucial associado ao risco das operações está nas medidas de mitigação adotadas. Medidas de mitigação são estratégias adotadas para diminuir o risco relacionado a determinadas situações de perigo. Essas estratégias podem incluir desde funcionalidades e equipamentos adicionados ao sistema, como luzes anticolisão e respostas automáticas a emergência, quanto exigência de qualificação mínima para o piloto e procedimentos operacionais voltados a garantir a segurança da operação.<sup>[54] [57]</sup>

#### 2.2.4.1 Procedimentos anormais e de emergência

Todas as operações de RPAS devem contar com procedimentos bem estabelecidos para contingenciar situações de perigo (ou emergências) – *i.e.*, meios de mitigação de risco.<sup>[30]</sup> Esses procedimentos são, em muitos casos, direcionados ao piloto, contudo, muitos sistemas com alto nível de automatização contam com procedimentos automatizados (*i.e.*, que não dependem da ação do piloto remoto) para recuperação de emergências.

Nesses casos, o de controlador automático é capaz de monitorar constantemente as condições de voo e de saúde do subsistemas de maneira geral. Dessa forma, caso a RPA apresente comportamentos ou condições anormais ou que ameacem extrapolar as limitações de desempenho do RPAS ou outras limitações operacionais (*e.g.*, evasão da área autorizada para voo), o controlador automático do RPAS é capaz de detectar esses comportamentos ou condições<sup>§</sup> e responder automaticamente de forma a minimizar os possíveis impactos da ocorrência.

No contexto da operação de sistemas não tripulados, três situações que geralmente requerem a execução de procedimentos de emergência e merecem especial destaque são: perda da comunicação entre GCS e RPA; perda de capacidade de navegação da RPA e perda do controle da RPA.<sup>[30] [14]</sup> Alguns dos procedimentos mais comuns encontrados nos RPAS

<sup>§</sup> A capacidade de detecção das situações de perigo é determinada pelos sensores embarcados na RPA e pela lógica do *software* embarcado. Em termos gerais, os RPAS multirotores mais comuns são capazes de detectar falhas relacionadas a perda de sensores, evasão de área controlada, perda de comunicação e perda de controle de voo. Há ainda sistemas capazes de detectar ameaças externas, como obstáculos na trajetória de voo.

comerciais para mitigar a severidade dessas casos de falha envolvem a ativação de uma rotina de retorno automático para um ponto conhecido (para o caso de perda do enlace) e mecanismos de terminação automática de voo (para perda de controle ou capacidade de navegação) que envolvem, geralmente, sistemas para diminuir a energia cinética da queda (*e.g.*, paraquedas).<sup>[4]</sup>

### 2.2.5 Operações de pulverização

Operações de pulverização com RPAS são aquelas conduzidas com o objetivo de aplicação de agrotóxicos e afins, sobre áreas desabitadas e por meio de sistemas de aeronaves não tripuladas próprios para esse fim – *i.e.*, RPAS de pulverização.<sup>[25]</sup> No geral, essas operações podem ser de dois tipos: aplicações localizadas ou pulverização de área total.

Nas aplicações localizadas, como o próprio nome indicada, o interesse é a aplicação de insumos apenas locais específicos da plantação (*i.e.*, porções relativamente pequenas da plantação), previamente mapeados. Essas operações são realizadas, por exemplo, para combater focos de infestação de pragas e doenças na lavoura (atividade conhecida como “catação”) ou para aplicação de fertilizantes e outros insumos agrícolas somente em áreas que apresentam alguma deficiência. Dada a alta precisão na aplicação e a facilidade de deslocamento das RPA nas lavouras, os *drones* de pulverização conquistaram um grande espaço no mercado nesse tipo de operação.<sup>[58][59]</sup>

Já nas operações de área total, o objetivo é a aplicação do produto em toda (ou grande parte) da plantação. Esse tipo de operação normalmente é realizada por tratores ou aeronaves agrícolas. A não ser em áreas relativamente pequenas, com o terreno muito acidentado ou de difícil acesso para aviões tripulados e tratores, os *drones* de pulverização, principalmente devido a relativa pouca capacidade de carregar carga, ainda encontra dificuldade para competir nesse mercado.<sup>[59]</sup> Nessas operações, os *drones* são utilizados, em geral, para complementar os meios de aplicação tradicionais, por exemplo, realizando a pulverização de agrotóxicos em áreas onde existem restrições para aplicação com aeronaves tripuladas<sup>h</sup> ou nas áreas das bordas da plantação, onde não é possível realizar a aplicação com tratores de forma eficiente. Contudo, os recentes avanços da regulamentação de sistemas de aeronaves não tripuladas e a própria evolução da capacidade dos RPAS tem gerado cenários promissores para os *drones* nesse tipo de operação.<sup>[24]</sup>

Apesar dessas diferenças, as fases que compõem ambos os tipos de operações são, no geral, as mesmas do ponto de vista de execução de atividades. Em ambos os casos, inicialmente, há uma etapa de planejamento, que envolve desde a checagem da validade das autorizações necessárias para voo até a definição local de voo, trajetória a ser executada e procedimentos necessários para garantia de segurança da operação. Como já mencionado na Seção 2.1.2, grande parte dos RPAS de pulverização contam com *softwares* que auxiliam no planejamento da missão.

<sup>h</sup> Nas aplicações com aeronaves tripuladas o fenômeno da deriva, que é o desvio das gotas de agrotóxico no ar de modo que eles não atinjam o seu alvo, pode representar um grande risco para as áreas adjacentes à plantação, por isso existem restrições para proteger áreas habitadas e áreas de preservação.<sup>[60]</sup>

No caso de aplicações em áreas maiores, a rota de voo (*i.e.*, conjunto de linhas de trajetória) é planejada de forma que a RPA percorra toda a área de interesse, com o mínimo de sobreposição de linhas de trajetória possível (para evitar a aplicação duplicada de produto) e de forma que a aeronave decole e pouse em um mesmo local, em geral, próximo ao piloto remoto. Esse tipo de missão normalmente é caracterizada por uma série de linhas de trajetórias paralelas alongadas, ligadas por curvas curtas, conforme apresentado na Figura 11. A distância entre as linhas de trajetória está relacionada com a cobertura da aplicação do produto. Já em aplicações localizadas, a trajetória planejada para voo está diretamente vinculada com os locais disponíveis para pouso e decolagem e as áreas de interesse previamente mapeadas.

Figura 11 – Exemplo de missão de pulverização com dois polígonos de voo.



Fonte: Disponibilizado pelo fabricante.

Em seguida, há uma etapa de preparação para voo. Nessa etapa, geralmente, todos os equipamentos são posicionados e sua integridade para o voo é verificada através de inspeções pré-voo. É também nessa etapa que o piloto remoto responsável pela operação deve avaliar as condições gerais da área de operação para determinar se o voo pode ocorrer de forma segura e de acordo com as regulamentações locais (*e.g.*, avaliação das condições climáticas). Após a etapa de preparação para voo, caso aplicável, dá-se início ao voo propriamente dito da RPA para o cumprimento da missão desejada.

A etapa de voo de uma RPA se inicia com a decolagem. Uma das principais vantagens dos RPAS multirotores, que é o caso da maioria dos RPA de pulverização disponíveis no mercado, é que a aeronave que compõe esse sistema é capaz de decolar e pousar verticalmente. Essa característica faz com que seja dispensada a necessidade de infraestruturas para pouso e decolagem (*i.e.*, pistas) e demais sistemas de lançamento (*e.g.*, catapultas). Dessa forma, a etapa

de decolagem consiste na RPA, após o devido comando do piloto remoto, iniciar uma subida vertical com velocidade controlada até uma determinada altura desejada. A partir daí é iniciado o deslocamento até a área de interesse, que, para o caso da aplicação em área total, deve ser o mais breve possível, com o intuito de aumentar a eficiência da operação – *i.e.*, evitar que a RPA gaste sua fonte energética no deslocamento e não na aplicação em si.

Já na área de interesse, a aplicação do produto é realizada em velocidades e alturas relativamente baixas, para garantir uma maior eficiência – evitando, por exemplo, a deriva de agrotóxicos para áreas inapropriadas, o que pode representar um grande risco para a sociedade.<sup>[60]</sup> A altura da aplicação é, em geral, até 3 m acima da altura da cultura pulverizada e a velocidade pode variar aproximadamente de 6 a 14 m/s.<sup>[61][37][62]</sup> É comum, nas operações de aplicação em área total, que a autonomia de voo da aeronave ou a capacidade de armazenamento de produto não seja suficiente para completar toda a missão. Nesses casos, a RPA, em geral, detecta a falta de insumo ou a baixa energia e retorna para o local de pouso e decolagem, onde é reabastecida e segue novamente para completar a missão – esse processo pode ocorrer diversas vezes ao longo de uma missão, a depender do tamanho da área e da capacidade do sistema.

Por fim, após a realização da aplicação em todos os locais de interesse, a aeronave retorna pela última vez para o pouso, onde os preparativos finais são feitos e a operação é encerrada.

### 2.3 O desempenho humano como operador de máquinas

Toda máquina projetada para possuir, durante sua operação, algum nível de interação com o ser humano, tem a sua eficiência dependente tanto dos seus próprios componentes, arquitetura e interações internas quanto do desempenho do componente humano. Em outras palavras, em qualquer máquina (sistema inanimado) que necessite da atuação humana, a capacidade desse equipamento em realizar a sua função com o desempenho esperado depende também da capacidade do operador. Portanto, a única forma de analisar o desempenho geral de um equipamento e, por consequência, os impactos gerados por esse equipamento no ambiente que o envolve, é considerar o conjunto homem-máquina como um sistema único.<sup>[63]</sup>

Assim, da mesma maneira que é necessário conhecer e compreender todas as variáveis que influenciam no desempenho do componente inanimado (*i.e.*, especificações dos componentes, fluxos de informações, inter-relações entre sistemas, variáveis de desempenho, *etc.*), faz-se necessário, também, a compreensão de todas as variáveis que influenciam a eficiência com a qual o ser humano é capaz de manusear e, de forma mais ampla, operar o sistema. É com esse intuito que nasce a disciplina dos Fatores Humanos, ramo da ciência responsável pela compreensão das interações entre os humanos e outros elementos do sistema.<sup>[63]</sup>

Para o estudo de aspectos relacionados à capacidade de pilotagem de várias RPA simultaneamente, tema deste trabalho, é fundamentalmente uma análise dos fatores humanos envolvidos nesse tipo de operação de sistemas de aeronaves não tripuladas. Assim, da mesma forma que, nas

seções anteriores, foram apresentadas as características gerais e principais conceitos relacionados aos RPAS, na presente seção estão descritos alguns conceitos relacionados à capacidade humana como operador de máquinas. Em um primeiro momento, são descritos, de forma introdutória, alguns modelos relacionados ao funcionamento do cérebro humano. Em seguida, conceitos relacionados à avaliação de carga de trabalho mental e uma breve introdução do impacto dos fatores humanos na operação de RPAS são apresentados

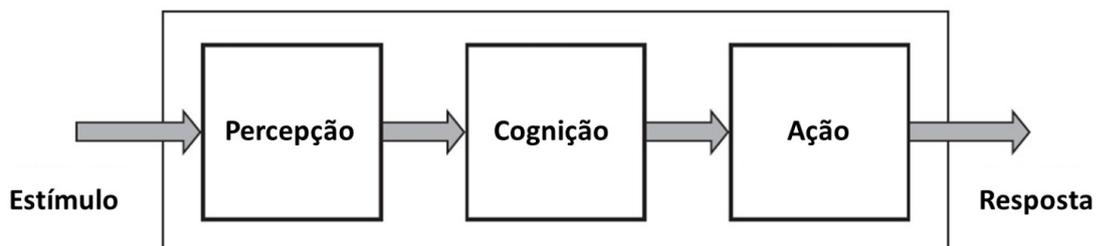
### 2.3.1 Modelos de processamento de informação

A compreensão das limitações da capacidade humana como operador de sistemas inanimados passa, necessariamente, pelo entendimento de como se dá o processamento de informações pelo corpo humano. Muitos dos modelos mais difundidos para a descrição do processamento de informação no ser humano adotam uma abordagem sistêmica, isso é, nesses modelos, o fluxo de informação é caracterizado como um sistema formado por diversos subsistemas que recebem um conjunto de dados, atuam sobre eles e dão uma resposta baseada nesses dados.<sup>[63]</sup>

A ideia do desenvolvimento desses modelos é tornar possível antecipar e analisar os diversos aspectos que limitam o desempenho humano em diferentes tarefas (ou mesmo nos diferentes componentes de uma tarefa) e em diferentes condições. Existem vários modelos, com diferentes níveis de detalhamento (diferente número de subsistemas), a depender da profundidade desejada da análise e do aspecto do processamento humano de interesse. Um dos modelos mais simples é o modelo de três estágios.<sup>[63]</sup>

Esse modelo estabelece a existência, como o próprio nome indica, de três estágios entre a apresentação de um estímulo para o ser humano e a execução da resposta em si. Os estágios identificados são a Percepção, a Cognição e a Ação, com o fluxo de informação passando do primeiro para o último, em série, conforme apresentado na Figura 12. Cada uma dessas etapas está associada a diferentes limitações relacionadas ao desempenho humano.<sup>[63]</sup>

Figura 12 – Representação do modelo de processamento de informação humana de três estágios.



Fonte: Adaptado de Proctor e Zandt<sup>[63]</sup>.

No modelo de três estágios, o primeiro estágio, a percepção, está associado às maneiras pelas quais o ser humano identifica o estímulo. Ou seja, é através da percepção que o ser humano

é capaz de captar a informação externa para que, em seguida, possa interpretá-la. A percepção de estímulos no ser humano está diretamente ligada aos sistemas sensoriais (*e.g.*, visão, audição, tato, paladar e olfato), que é o responsável por captar estímulos do ambiente (*e.g.*, cheiros, padrões de luminosidade, sons, *etc.*) e transformá-los em impulsos nervosos para serem interpretadas pelo cérebro. A capacidade do cérebro de interpretar os sinais recebidos e atuar de forma a responder da melhor maneira possível, dessa forma, está diretamente associada à qualidade das informações captadas.

Existem diversos fatores que limitam a qualidade da recepção do estímulo. Dentre esses fatores, estão a duração e a clareza do sinal captado que, por sua vez, estão diretamente associados à capacidade do indivíduo que capta essas informações. Considerando, por exemplo, estímulos sonoros como a fala: para que uma pessoa seja capaz de interpretar corretamente o que está sendo falado por outra, não pode haver muito ruído no ambiente próximo e o transmissor da mensagem deve ser capaz de falar em uma velocidade e intensidade compatíveis com a capacidade do ouvinte.<sup>[63]</sup>

O segundo estágio do modelo, por sua vez, está relacionado justamente com a atuação do cérebro sobre o estímulo percebido, de forma a interpretá-lo e produzir uma resposta, caso considere necessário. São diversos os processos que podem estar presentes na etapa da cognição, como a comparação entre estímulos, consulta de informações na memória, tomada de decisões, entre outros. As limitações associadas à etapa de cognição estão relacionadas à atenção e ao uso dos recursos cognitivos, que serão melhor descritos nas seções seguintes.<sup>[63]</sup>

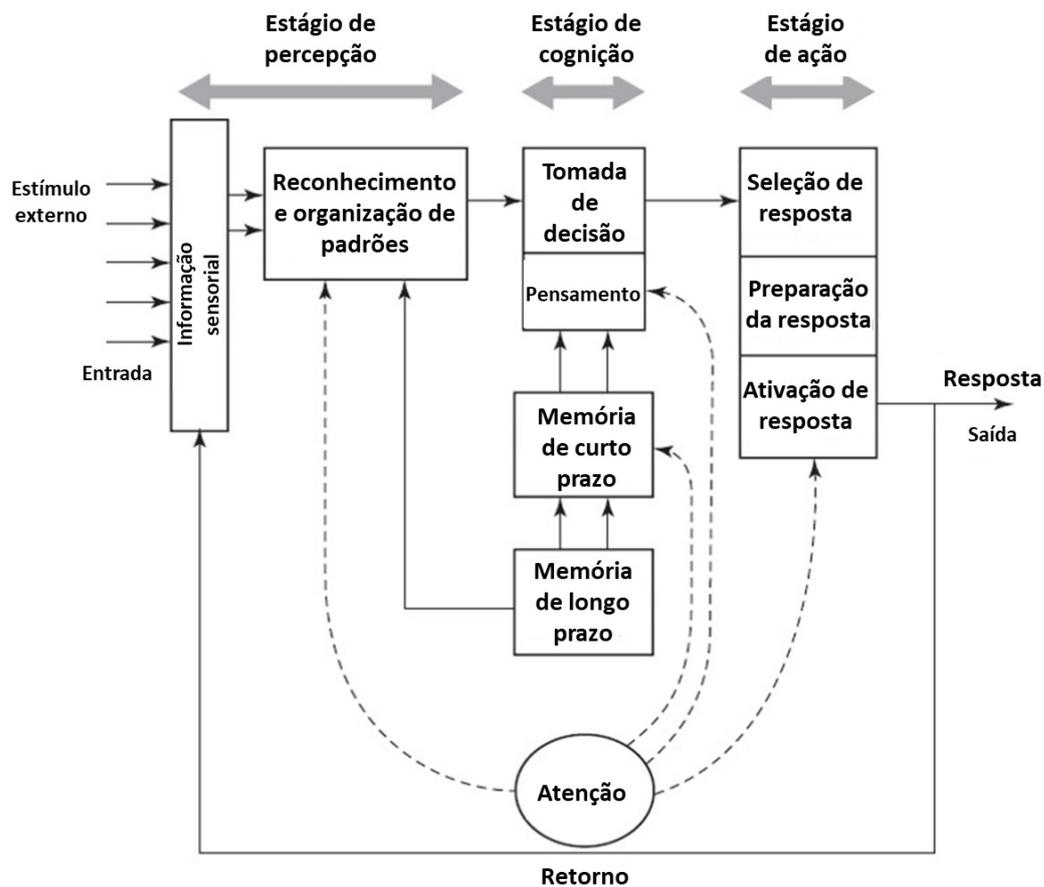
O terceiro e último estágio do processamento de informação humano é a ação, etapa relacionada à execução física da resposta. Caso a cognição decida pela necessidade de se efetuar uma resposta, o processo seguinte envolve a escolha da melhor resposta a ser executada (seleção) e, após selecionada, a conversão dessa resposta em comandos neuromusculares para os membros do corpo (ou outras partes), que serão os responsáveis pela interação com o ambiente. Um aspecto importante é que a resposta a ser executada precisa ser bem programada, uma vez que deve cumprir certos requisitos de precisão e intensidade, por exemplo.<sup>[63]</sup>

Dessa forma, segundo o modelo proposto, o processamento de informação humano consiste: na aquisição de informações do ambiente (estímulos), através dos sistemas sensoriais, na etapa conhecida como percepção; no processamento efetivo dessa informação através do uso de recursos mentais (cognição); e, por fim, caso necessário, na execução de uma resposta no ambiente (ação). Todo esse processo faz parte da execução de uma tarefa por parte de um ser humano (*e.g.*, operação de uma máquina), e é a partir dele que é possível compreender os diversos fatores que afetam o desempenho na execução dessa determinada tarefa para cada um dos diferentes estágios.<sup>[63]</sup>

Outros modelos, mais detalhados, consideram que cada estágio é formado por diversos subsistemas, conforme apresentado na Figura 13. Através da análise mais detalhada dos diferentes subsistemas de cada etapa do processo é possível dar maior profundidade ao entendimento dos

diversos fatores que influenciam no desempenho humano. Destaca-se, contudo, que, apesar de extremamente útil para algumas aplicações, o modelo dos três estágios, mais ou menos detalhado, possui algumas limitações. Por exemplo, esse modelo não considera, para a avaliação do desempenho, uma etapa anterior à percepção, onde o indivíduo se prepara para a realização da tarefa, e também não considera a relação cíclica entre ação e percepção.

Figura 13 – Representação do modelo mais detalhado de processamento de informação humana de três estágios.



Fonte: Adaptado de Proctor e Zandt<sup>[63]</sup>.

### 2.3.2 Modelos de atenção e comportamento humano

A atenção, no contexto de estudo dos fatores humanos, está diretamente associada a alocação de recursos cognitivos para a execução dessa determinada tarefa e, portanto, diretamente relacionada ao desempenho na execução dessa tarefa. Em outras palavras, onde é direcionada a atenção determina a qualidade com que percebemos, memorizamos, processamos e agimos em dada informação. Tarefas que não recebem a atenção necessária, considerando a demanda cognitiva para sua execução com um determinado desempenho, portanto, tendem a ter esse desempenho prejudicado.<sup>[63]</sup>

Existem diversos modelos que descrevem o processo de alocação de recursos cognitivos por meio da atenção nos seres humanos. Dentre eles, destacam-se os chamados modelos de recurso, que consideram que o ser humano possui uma quantidade limitada de recursos disponíveis para serem alocados para as atividades mentais. Dessa forma, o desempenho do indivíduo ao realizar uma determinada tarefa é afetado quando não há recursos suficientes para suprir a demanda da tarefa.<sup>[63]</sup>

Dentre os modelos de recurso é possível encontrar duas abordagens distintas principais. Em primeiro lugar, têm-se os chamados modelos de recurso unitário. Segundo esses modelos, os seres humanos possuem um único “reservatório” de capacidade limitada de recursos de processamento mental (recursos de atenção), que são alocados nas tarefas conforme a demanda. Assim, o desempenho em uma determinada tarefa é adequado desde que haja capacidade de atenção disponível. Caso contrário, na execução de tarefas simultâneas em que a demanda é maior do que a capacidade de recursos cognitivos, o sistema de processamento de informação tem que adotar uma estratégia para alocação dos recursos disponíveis nas diferentes atividades, gerando um prejuízo no desempenho.<sup>[63]</sup>

Além disso, esse modelo considera que a quantidade de recursos disponíveis é variável, a depender da demanda da tarefa. Em situações onde há uma exigência muito baixa por recursos mentais, por exemplo, a quantidade de recursos disponíveis também é menor – o que explica a perda de rendimento já observada em situações de nível de exigência muito baixas. Esse tipo de comportamento é muito observado na operação de sistemas com alto grau de automatização.<sup>[63]</sup>

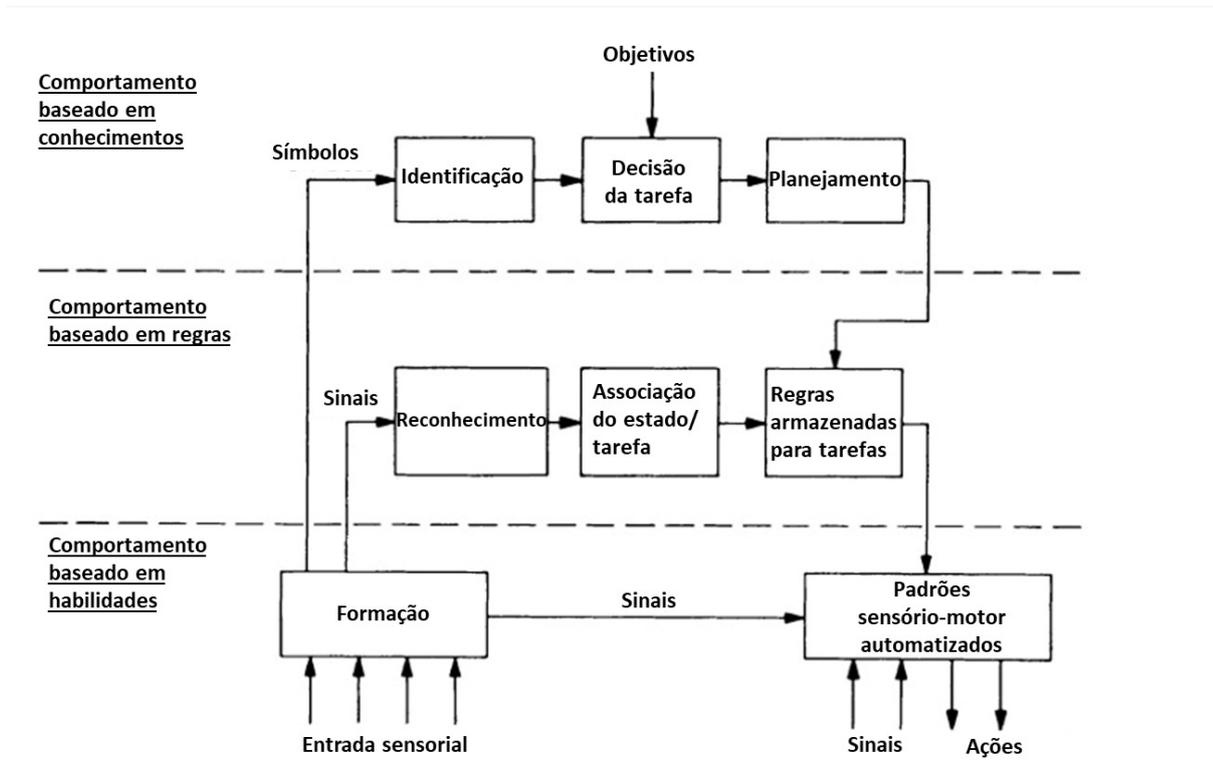
A segunda abordagem relacionada aos modelos de recurso, por outro lado, não considera a existência de apenas um reservatório de recursos cognitivos, mas múltiplos, cada qual associado a um subsistema cognitivo. Por essa razão, esses modelos são conhecidos como modelos dos recursos múltiplos. Neles, é considerado que existem diferentes tipos (ou dimensões) de demandas cognitivas para realização de uma dada tarefa (*e.g.*, uma tarefa pode exigir uma resposta verbal e outra manual, ou a percepção pode ser visual ou auditiva), e para cada uma dessas dimensões há uma quantidade limitada de recursos disponíveis. Assim, quanto mais duas tarefas exigirem recursos de reservatórios distintos, melhor o desempenho na execução simultânea de ambas. Esse tipo de modelo permite, portanto, que sejam avaliados não só a demanda cognitiva de uma determinada tarefa, mas o tipo de demanda.<sup>[63]</sup>

Em ambos os casos, apesar da relação direta entre a atenção e o desempenho, considerando a quantidade limitadas de recursos cognitivos, há ainda fatores que podem influenciar a quantidade de recursos necessários para a execução de determinada tarefa de forma a cumprir seus requisitos. Uma resposta muito treinada a um estímulo bem conhecido, por exemplo, pode exigir uma carga cognitiva e, portanto, uma atenção muito menor do que quando não há conhecimento prévio do estímulo ou treinamento. Esse tipo de característica está ligada aos modelos de comportamento humano relacionados à interação homem-máquina. Um desses modelos comportamentais foi proposto por Rasmussen<sup>[64]</sup>. Nele, o ser humano pode apresentar três tipos

de comportamentos durante a execução de uma resposta a partir de um dado estímulo, conforme descrito a seguir.

O primeiro tipo é o comportamento baseado em habilidade, no qual o corpo apresenta uma resposta a um estímulo conhecido com utilização mínima de carga cognitiva. Esse tipo de comportamento está associado à uma grande familiarização com o estímulo e com a resposta, gerando uma espécie de “mecanização” do processo. Devido à baixa carga cognitiva demandada, a atenção dispendida é mínima, fazendo com que a execução da tarefa possa passar despercebida pelo indivíduo. O segundo tipo é o comportamento baseado em regra, em que uma carga mental maior é demandada, no entanto, a resposta ao estímulo é feita baseada em regras já memorizadas de outras experiências. Por fim, o terceiro tipo de comportamento é o baseado em conhecimento. Esse é o tipo de comportamento com maior demanda cognitiva, em que atividades como abstração e tomada de decisão relacionada a situações relativamente novas são necessárias. A Figura 14 traz uma representação do modelo descrito. Vale destacar, por fim, que o tempo de resposta necessário (a partir da percepção das informações de entrada) é diretamente proporcional à carga mental utilizada no modelo proposto.

Figura 14 – Representação do modelo comportamental humano



Fonte: Adaptado de Rasmussen<sup>[64]</sup>.

### 2.3.3 Métodos de avaliação da carga de trabalho mental

Carga de trabalho pode ser entendida como a quantidade total de esforço necessário para um indivíduo executar uma determinada tarefa (ou conjunto de tarefas) em um determinado tempo. Em outras palavras, é a carga, tanto física quanto mental, necessária para a realização de uma ou mais tarefas com um certo nível de precisão e qualidade e em um tempo determinado. Dessa forma, quanto mais exigentes forem as tarefas a serem executadas, ou quanto menor for o tempo disponível para sua execução, maior a carga de trabalho.<sup>[63]</sup>

A carga de trabalho, especialmente a carga de trabalho mental, que pode ser definida, de forma simplificada, como a proporção de recursos cognitivos demandados por uma tarefa<sup>[65]</sup>, está intimamente relacionada com a atenção, uma vez que representa a quantidade de recursos de atenção (*i.e.*, recursos mentais) necessários para cumprir um determinado objetivo de desempenho relacionado a uma tarefa. Mais especificamente, o conceito de carga de trabalho mental está diretamente associado aos modelos de atenção de recursos – que considera que o operador tem uma quantidade limitada de recursos mentais disponíveis para a execução de tarefas (consultar Seção 2.3.2). Esta carga de trabalho também é afetada por fatores ambientais e situacionais externos, bem como por características inerentes dos indivíduos que executam as tarefas.<sup>[66]</sup> Nesse contexto, fica claro a relação direta entre carga de trabalho mental e desempenho humano na realização de tarefas.<sup>[63]</sup>

Dada a relação entre carga de trabalho mental e desempenho, o objetivos dos métodos de avaliação de carga de trabalho mental é justamente determinar se a condição na qual uma determinada tarefa está sendo realizada é a ideal, ou, pelo menos, se atende os padrões mínimos necessários para a obtenção de um desempenho adequado. A avaliação da carga de trabalho mental, serve, portanto, para que seja possível a sua manutenção dentro de um nível adequado para realização das tarefas.<sup>[63]</sup>

A carga de trabalho mental não é afetada apenas pela exigência de determinada tarefa ou pelo tempo disponível para realizá-la. Outros fatores que afetam a carga de trabalho mental são as condições do ambiente na qual está sendo realizada a tarefa (*i.e.*, temperatura, umidade, nível de ruídos, espaço disponível *etc.*), o nível de treinamento e as condições fisiológicas de quem executa a tarefa, assim como as próprias capacidades cognitivas do executante. Outros fatores fundamentais são o número de tarefas sendo executados simultaneamente e o tipo dessas tarefas, considerando o modelo dos recursos múltiplos – nesse caso, tarefas que demandam o mesmo tipo de recurso de atenção são mais difíceis de serem realizadas simultaneamente.<sup>[63]</sup>

A carga de trabalho mental é uma grandeza que não pode ser diretamente observada ou mensurada. A sua avaliação, portanto, depende de fatores que estão relacionados à ela e que podem ser observados ou mensurados.<sup>[67]</sup> Alguns dos fatores observados para determinar a carga de trabalho mental em determinadas tarefas são: o tempo necessário para execução de determinada tarefa ou subtarefas; respostas fisiológicas da corpo (*e.g.*, batimento cardíaco e

quantidade de suor produzido) durante a realização das tarefas; o desempenho alcançado (caso seja mensurável); as impressões do indivíduo quanto à execução, entre outros.<sup>[63]</sup>

Existem diversos métodos de avaliação de carga de trabalho mental, que, normalmente, podem ser divididas em dois grupos. O primeiro grupo é o das metodologias baseadas em técnicas empíricas e o segundo é o grupo das metodologias baseadas em técnicas analíticas. Técnicas empíricas são aquelas que usam observações e medições realizadas no ambiente operacional (*i.e.*, operação real) ou em ambientes simulados para a avaliação da carga de trabalho, enquanto as técnicas analíticas são aquelas que desenvolvem modelos matemáticos que procuram prever a carga de trabalho mental a partir das condições de trabalho conhecidas.<sup>[63]</sup>

As metodologias de avaliação de carga de trabalho mental mais difundidas e mais avançadas atualmente são as baseadas em técnicas empíricas. Estas, por sua vez, podem ser novamente reclassificadas em duas categorias principais. As técnicas subjetivas, primeiro grupo, são aquelas baseadas na percepção do próprio executante. Essas técnicas normalmente consistem em formulários compostos por perguntas cuidadosamente selecionadas e apresentadas ao operador durante ou após a execução da tarefa para avaliar as impressões deste com relação às exigências dessa tarefa. Nesses casos, é bastante comum a utilização de escalas para permitir comparar diversas tarefas ou uma mesma tarefa realizada em condições distintas. As técnicas subjetivas são bastante utilizadas por sua simplicidade de aplicação e pela possibilidade de avaliação de diversos fatores. Contudo, a inerente dependência do julgamento individual apresenta uma desvantagem dessas técnicas.<sup>[63]</sup>

O segundo grupo é o baseado em técnicas objetivas que, por sua vez, podem ser divididas em métodos baseados em medições de desempenho e métodos baseados em medições neurofisiológicas. As técnicas baseadas em medições de desempenho se utilizam justamente da relação íntima entre carga de trabalho mental e desempenho. Assim, ambientes controlados são estabelecidos para determinar a influência de diferentes fatores na carga de trabalho mental através das variações no desempenho para execução de uma determinada tarefa (essas variações de desempenho podem ser determinados, por exemplo, a partir do tempo necessário para a execução da tarefa ou a partir da precisão da execução). Uma questão relacionada a esse tipo de técnica é que a relação entre desempenho e carga de trabalho mental nem sempre é linear, o que pode gerar problemas para a análise.<sup>[63] [68]</sup>

Por fim, os métodos baseados em medições neurofisiológicas levam em conta os efeitos provocados pela alteração da carga de trabalho mental no sistema nervoso humano – mais especificamente, esses efeitos estão ligados à atividade do sistema nervoso simpático, divisão do sistema nervoso autônomo responsável por comandar as respostas do corpo a situações de estresse e emergências<sup>[69]</sup>. Esse sistema, quando afetado por fatores relacionados ao aumento na carga de trabalho mental, provoca reações como alterações na frequência cardíaca e respiratória, na temperatura corporal, na pressão arterial, na produção de suor, entre outros.<sup>[63] [68]</sup> Para essas medições são utilizados sensores ligados ao indivíduo durante a realização da tarefa. Alguns

dos tipos sensores mais comumente utilizados para a avaliação da carga de trabalho mental são: Eletrocardiograma (ECG), que mede a atividade elétrica do coração; Resposta Galvânica da Pele (GSR, do termo em inglês *Galvanic Skin Response*), que mede a atividade eletrodérmica da pele; Rastreamento Ocular (*Eye Tracking* no inglês), que mede o movimento dos olhos; Fluxo do Ar, que mede a atividade respiratória; e Eletroencefalograma (EEG), que mede a atividade do cérebro.<sup>[70]</sup>

#### 2.3.4 Consciência situacional

Outro conceito muito importante relacionado a Fatores Humanos e, mais ainda, quando no contexto de pilotagem de aeronaves, é a chamada consciência situacional. A consciência situacional pode ser definida como a percepção e interpretação das condições instantâneas e a projeção em um futuro próximo dos elementos do ambiente. Ou seja, como o próprio nome indica, consciência situacional é a consciência que um indivíduo possui das condições do ambiente que o envolve. Nesse sentido, a consciência está associada à capacidade de compreensão dos elementos do ambiente e de suas tendências de modificação para, não só entender como o ambiente está no momento, mas também ser capaz de projetar as condições desses fatores em momentos seguintes.<sup>[63] [71]</sup>

Especialmente no contexto da pilotagem de aeronaves, a importância da consciência situacional está, entre outros fatores, na capacidade de reação e tomada da melhor decisão possível em condições anormais ou de emergência. Isso acontece pois é necessário que o piloto compreenda e consiga projetar todos os elementos do ambiente (que, nesse caso, diz respeito tanto as condições da aeronave e demais sistemas quanto do ambiente que a cerca) que possam ter um impacto na segurança, de forma que suas ações contribuam para o contingenciamento da situação e não para seu agravamento. A consciência situacional não é só importante após o surgimento de situações anormais ou de emergência, mas também é essencial para que uma determinada situação normal não evolua para uma situação de risco, no caso de o piloto realizar uma avaliação incorreta das condições do sistema ou do ambiente que o cerca.

Os elementos do ambiente que um indivíduo toma consciência estão diretamente ligados à atenção. Ou seja, os elementos em que esse indivíduo aloca mais recursos de atenção são também aqueles que ele é capaz de perceber e compreender melhor. Da mesma forma, a consciência situacional estará limitada caso a atenção seja alocada para elementos do ambiente não relacionados ou de menor importância para uma determinada tarefa. Portanto, um fator fundamental relacionado ao desempenho na operação de máquinas, especialmente aeronaves e outros veículos, é quais informações são apresentadas ao operador de forma que o mesmo seja capaz de obter consciência situacional apenas dos elementos importantes para a manutenção da segurança da operação.<sup>[63]</sup>

Outro conceito importante muito ligado a consciência situacional é a memória de trabalho. Esse conceito diz respeito à parte da memória que tem a função de armazenar e manipular

temporariamente a informação. A memória de trabalho está envolvida, por exemplo, na realização de cálculos mentais, compreensão e elaboração de significados, *etc.* A consciência situacional, portanto, só é possível por causa da existência da memória de trabalho, pois é através dela que os seres humanos são capazes de interpretar as informações percebidas do ambiente e projetar suas condições no futuro próximo, baseado no padrão de comportamento detectado. A memória de trabalho é também a responsável pelo gerenciamento da atenção – *i.e.*, dividir a atenção ou focar em um único elemento, trocar a atenção de um elemento para outro, *etc.*<sup>[63]</sup>

### 2.3.5 Fatores Humanos nas operações de RPAS

Uma análise superficial poderia indicar que a influência dos fatores humanos em operações de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas é muito reduzida, dado o nível de automatização de grande parte dos sistemas e o próprio caráter remoto da operação. Contudo, algumas características únicas das operações envolvendo RPAS introduzem problemáticas para a questão da relação homem-máquina que, até então, não entravam em pauta nas já avançadas teorias relacionadas a influência dos fatores humanos na aviação tripulada. Isto significa que, mesmo que o piloto de um sistema não tripulado não esteja tão sujeito a condições como hipóxia e fatores de carga elevados, por exemplo, há, nas operações dos RPAS, importantes questões relacionadas ao desempenho humano a serem consideradas, como é o caso da perda da consciência situacional, principalmente em operações onde o piloto não é capaz de enxergar o veículo.<sup>[72]</sup> [4]

Dados retirados de estudos envolvendo operações militares de RPAS apontaram que mais de 50 % dos acidentes envolvendo RPAS em um período de 10 anos tiveram como causa (ou uma das causas) questões relacionadas aos fatores humanos. Vale destacar que, nesses estudos, foi considerada a influência dos fatores humanos não só na pilotagem em si, mas também em outros aspectos da operação, como fatores organizacionais. Esses mesmos estudos apontam diversas causas para as falhas humanas, dentre as quais destacam-se problemas relacionados a informações apresentadas para o piloto (instrumentação de voo); automatização de funções da RPA; canalização da atenção; orientações de procedimento; treinamento; superconfiança do operador; coordenação da tripulação; e carga de trabalho excessiva.<sup>[72]</sup>

Ressalta-se que operações civis de RPAS (tanto atuais quando as previstas para os próximos anos), de forma geral, apresentam diferenças significativas em relação às operações militares. Essas diferenças são observadas tanto do ponto de vista das características técnicas e de funcionamento dos sistemas, quanto de procedimentos operacionais, condições e ambiente de voo, cultura organizacional dos operadores, entre outros. Contudo, mesmo com essas discrepâncias, existem diversos fatores inerentes a qualquer operação de RPAS e que, portanto, são comuns em ambos os meios. Dessa forma, apesar de não ser possível afirmar que as proporções das causas de acidentes relacionadas a fatores humanos em operações militares de RPAS sejam representativas para operações civis, é razoavelmente esperado que as causas dos acidentes sejam questões que também podem afetar as operações civis, principalmente as mais complexas.

Especialmente para operações envolvendo mais de uma RPA por piloto remoto, conforme já mencionado em seções anteriores (Seção 2.1.3.2), os sistemas utilizados nesse conceito de operação necessariamente são sistemas com alto nível de automatização. Nesses casos, as principais tarefas do piloto durante o voo são aquelas relacionadas a supervisão e monitoramento das condições de voo de cada RPA e do ambiente que as cerca. Portanto, o limite de aeronaves que o piloto é capaz de supervisionar, considerando as operações em que as RPAs realizando missões independentes (*i.e.*, não são percebidas pelo piloto como um único sistema macro), está justamente ligado a capacidade de alocação de recursos mentais para as diferentes aeronaves.

Considerando o modelo de processamento de informação de três estágios (*vide* Seção 2.3.1), nota-se que as demandas da pilotagem de múltiplas RPAs estão principalmente associadas aos estágios da percepção e cognição. No estágio da percepção, a capacidade do piloto de captar e identificar com clareza e no tempo adequado todos os estímulos visuais e sonoros necessários é fundamental para a pilotagem segura. Sendo assim, quanto maior o número e a complexidade dos estímulos, menor será a capacidade do piloto a reagir quando necessário. Já no estágio da cognição, o processamento mental necessário para interpretar, priorizar e decidir sobre as informações recebidas também depende da quantidade e complexidade dessas informações, além da forma com que elas são apresentadas. A necessidade de alocar recursos cognitivos entre diversas fontes e tomar decisões rápidas pode sobrecarregar o piloto, afetando a precisão e a eficiência das respostas. O aumento do número de RPAs por piloto remoto, portanto, tende a aumentar a demanda sobre os pilotos, que possuem uma capacidade finita de recursos.

Apesar de os estudos relacionados ao impacto dos fatores humanos nesse tipo de operação ainda não estarem consolidados, especialmente no meio civil, existem outras atividades em que os tipos de demandas são semelhantes e que já possuem estudos em estágios mais avançados. Dentre essas atividades, especialmente por também estar relacionada ao meio da aviação, destacam-se os controladores de tráfego aéreo.

Assim como no casos das operações com mais de uma RPA simultaneamente, as tarefas dos controladores envolvem a supervisão e monitoramento de diversas aeronaves ocupando um determinado setor do espaço aéreo. Além disso, em operações normais, o controlador também é responsável por executar a comunicação com as aeronaves, conforme o necessário, e realizar outras tarefas secundárias que, contudo, estão mais relacionadas à demandas de atenção do que de outro tipo (*e.g.*, físicas). Por ser uma atividade crítica para a segurança da aviação no geral, a capacidade dos controladores é um tópico amplamente estudado. Atualmente é considerado que a capacidade dos setores do espaço aéreo é limitada pela carga de trabalho mental dos controladores. Por tanto diversas técnicas subjetivas e objetivas de avaliação da carga de trabalho são empregadas para avaliação da carga de trabalho mental dos controladores durante a execução de suas tarefas.<sup>[73][74][67]</sup>



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos empregados para a aquisição dos dados de carga de trabalho usados como base para o estudo do impacto do desempenho humano em operações de pulverização de múltiplas RPAs.

#### 3.1 Visão geral do experimento

O objetivo global do presente projeto é reunir informações que possam contribuir para uma maior compreensão de como determinados fatores humanos afetam operações de pulverização agrícola envolvendo a pilotagem de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas. O intuito é que as informações levantadas nesse estudo possam servir de apoio para a evolução da regulamentação no sentido de viabilizar a ocorrência rotineira desse tipo de operação.

Para alcançar esse objetivo, propôs-se a realização de testes de avaliação de carga de trabalho mental em ambiente simulado. A escolha da realização dos experimentos simulados se deu devido ao tipo de demanda esperada nas operações de RPAS de pulverização, *i.e.*, demanda predominantemente cognitiva originada da interação do piloto com a estação de controle; devido a maior acessibilidade para o uso do simulador em comparação com uma operação envolvendo aeronaves reais; e devido a relativa menor complexidade de aquisição e tratamento de parâmetros de interesse em ambiente simulado.

Dessa forma, nos testes propostos, indivíduos com diferentes níveis de experiência (*vide* Seção 3.4) foram submetidos a execução de uma série de tarefas que buscaram simular o tipo de demanda esperada durante uma operação normal de uma ou mais aeronaves remotamente pilotadas de pulverização. No decorrer da execução dessas tarefas, dados de carga de trabalho dos participantes foram obtidos por meio de medições objetivas e subjetivas. Esses dados foram utilizados para avaliar o impacto do aumento do número de aeronaves remotamente pilotadas na capacidade de execução das tarefas de pilotagem pelos pilotos.

O experimento foi dividido em três etapas, cada uma com um número diferente de aeronaves remotamente pilotadas sob supervisão de um piloto. Cada etapa, por sua vez, se subdividiu em mais três subetapas nas quais os pilotos reagiam a diferentes situações tipicamente esperadas em operações de pulverização.

Na primeira etapa, o piloto era responsável apenas por uma aeronave, conforme são realizadas as operações atuais. Essa etapa inicial serviu como linha de base para avaliação do aumento de carga de trabalho nas outras etapas. Em cada uma das etapas seguintes uma RPA sob a supervisão do piloto era acrescentada – *i.e.*, duas RPAs sob supervisão na segunda etapa e três RPAs sob supervisão na última etapa.

Quanto às subetapas, a primeira consistia em um voo típico, sem incidentes. Na segunda

subetapa ocorria uma falha pré-determinada em uma RPA, com acionamento o modo de retorno para pouso automático. Nesse caso, o piloto deveria reconhecer a falha e identificar o procedimento correto a ser executado. Por fim, na última subetapa uma aeronave invasora era inserida no ambiente simulado, cabendo ao piloto responder ao evento conforme procedimento previamente instruído.

Ao final de cada subetapa o piloto testado respondia a um formulário simplificado para avaliação da carga de trabalho percebida. Já ao final de cada etapa, ou seja, após a finalização de três subetapas, um formulário mais completo era preenchido. Ao longo de toda execução do experimento o indivíduo teve sua atividade eletrodérmica mensurada por um sensor de Atividade Galvânica da Pele (GSR) instalado. Cada subetapa durou em média 10 minutos.

A Tabela 1 a seguir apresenta o resumo dos cenários propostos para o experimento (considerando as etapas e subetapas).

Tabela 1 – Resumo dos cenários propostos para o experimento.

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Subetapa 1	- Uma RPA sob supervisão do piloto - Voo sem incidentes	- Duas RPAs sob supervisão do piloto - Voo sem incidentes	- Três RPAs sob supervisão do piloto - Voo sem incidentes
Subetapa 2	- Uma RPA sob supervisão do piloto - Falha com retorno para pouso	- Duas RPAs sob supervisão do piloto - Falha com retorno para pouso	- Três RPAs sob supervisão do piloto - Falha com retorno para pouso
Subetapa 3	- Uma RPA sob supervisão do piloto - Aeronave invasora	- Duas RPAs sob supervisão do piloto - Aeronave invasora	- Três RPAs sob supervisão do piloto - Aeronave invasora

Fonte: Elaboração própria.

## 3.2 RPAS Simulado

O sistema simulado é o Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS) comercial típico para pulverização de lavouras STRATUS H12®, da fabricante brasileira ARYS Tecnologia Embarcada Ltda.<sup>[61]</sup>.

### 3.2.1 RPA

O STRATUS H12® é composto por uma RPA multirotor de aproximadamente 35 kg de peso máximo de decolagem, com quatro motores elétricos apoiados em hastes de suporte formando um “X” em relação a carenagem central, onde estão localizados os demais subsistemas da aeronave – *i.e.*, aviônicos, tanque de armazenamento de insumo e fonte de energia (Figura 15). A Tabela 2 apresenta algumas informações de desempenho da RPA.

Essa aeronave conta com um sistema de controle de voo embarcado com alto grau de automatização, isto é, possui um controlador capaz estabilizar, guiar e navegar a aeronave segundo trajetórias pré-planejadas. Esse controlador também se comunica com o subsistema de pulverização, controlando a aplicação conforme o planejamento da missão. A lei de controle

Figura 15 – RPAS de pulverização STRATUS H12®.



Fonte: ARYS<sup>[61]</sup>.

Tabela 2 – Dados de desempenho da RPA STRATUS H12 ®

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor nominal</b>
Velocidade de deslocamento	6 m/s (21,6 km/h)
Autonomia nominal de voo	15 minutos
Velocidade máxima de pulverização	5 m/s (18 km/h)
Capacidade do reservatório	12 L
Altura mínima de pulverização	3 m em relação a cultura

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante

utilizada pelo controlador do STRATUS H12 é baseada nas leis disponibilizadas pelo projeto de código aberto ArduPilot.<sup>[42]</sup>

Dessa forma, um voo normal da RPA pode ser feito de forma inteiramente automatizada, isto é, a aeronave é capaz decolar, realizar uma missão pré-definida (seguindo uma trajetória de *waypoints* pré-determinados) e pousar, sem a necessidade de atuação do piloto remoto. Contudo, caso necessário, o piloto pode, a qualquer momento, interferir no voo automatizado para garantir a segurança da operação ou o cumprimento da missão. No caso da do RPAS STRATUS H12, para interferir no voo automatizado o piloto deve alterar o modo de voo da RPA. Esses modos de voo, que definem o comportamento da RPA em voo, são as principais ferramentas do piloto para a mitigação de risco em caso de situações anormais ou de emergência. A lista completa de modos de voo da RPA, assim como sua descrição, está apresentada a seguir:

- Modo AUTO (operação normal): modo de voo da operação normal (missão de pulverização); neste modo, a RPA realiza todo o plano de voo sem a necessidade de comandos do piloto remoto, seguindo os *waypoints* pré-definidos durante o planejamento; controle, navegação e guiamento são automatizados.
- Modo MANUAL: modo de voo no qual apenas a função de controle (estabilização em voo) é automatizada, ficando as funções de navegação e guiamento a cargo do piloto remoto; no modo MANUAL, na ausência de comando do piloto, o sistema automático estabiliza a RPA no ponto onde ela se encontra, dando autonomia ao piloto para comandar a trajetória da aeronave.
- Modo RETORNAR: modo de voo de contingência no qual a RPA inicia uma trajetória em linha reta para o ponto de pouso e realiza o pouso (procedimento automático).
- Modo POUJAR: modo de voo no qual a aeronave inicia o procedimento de pouso (perda controlada de altitude) no local onde se encontra; nesse modo, o piloto remoto tem autonomia para modificar a trajetória da descida da RPA, mas não a razão de descida.
- Modo PARAR: modo de voo de emergência no qual a RPA permanece estabilizada no ponto do espaço onde ela se encontra, porém o piloto não tem autonomia para comandar a trajetória da aeronave.

O sistema de controle automatizado da RPA também é capaz de monitorar o *status* dos subsistemas e a presença de obstáculos na trajetória de voo. Ao detectar alguma situação que tem o potencial de prejudicar a segurança ou a eficiência da operação o sistema é capaz de reagir automaticamente enviando alertas para a RPS ou alterando o modo de voo de forma a mitigar os efeitos da situação de perigo.

### 3.2.2 GCS

A estação de controle de solo (GCS) do sistema STRATUS H12® consiste em um controle remoto portátil com um sistema de comunicação integrado. A GCS é alimentada por uma bateria também integrada e possui uma tela central tátil que funciona como interface de informações para o piloto — na GCS está instalado o *software* de planejamento, monitoramento e controle de voo. A GCS do RPAS STRATUS H12® está apresentada na Figura 16

Dentre os comandos da GCS durante a fase de voo da RPA estão:

- *joystick* de controle da taxa de subida e descida (apenas modo MANUAL) e a direção da frente da RPA
- *joystick* de controle do deslocamento horizontal da RPA
- botão liga/desliga

Figura 16 – GCS do RPAS STRATUS H12®.



Fonte: ARYS<sup>[61]</sup>.

- botão de ativação da bomba de pulverização
- botões para alteração do modo de voo – cada modo de voo tem um botão específico.

Alternativamente, um notebook comercial simples pode ser usado como GCS com as mesmas funcionalidades.

A GCS se comunica com a RPA por um enlace de comunicação direto, dessa forma, a aeronave deve permanecer, a todo instante, dentro da linha de visada de rádio. O alcance máximo do sistema de comunicação do RPAS é cerca de 700 *m*.

#### 3.2.2.1 *Software* de planejamento, monitoramento e controle de voo

O *software* de planejamento de missão e monitoramento e controle de voo utilizado pelo STRATUS H12® é uma versão personalizada do *software* de código aberto QGroundControl<sup>[43]</sup>. No planejamento da missão, através do *software*, são definidos a(s) área(s) a ser(em) pulverizada(s), a trajetória a ser realizada no voo automatizado e as alturas e velocidades para cada fase de voo. Também são determinados os pontos de pouso e decolagem e os limites da área de operação. A Figura 11 apresenta um exemplo de missão planejada na GCS do RPAS de pulverização STRATUS H12® com dois polígonos de voo.

Já durante o voo, o *software* é responsável por apresentar para o piloto, através da tela da GCS, todas as informações necessárias para o voo, além de permitir o envio de comandos para a

RPA. Dentre as informações disponibilizadas para o piloto estão: posição e rumo da RPA no mapa; linhas de trajetória programadas para a missão; *status* do gerador; indicação do modo de voo; *status* da solução posição; intensidade do sinal do enlace C2; indicador de carga da bateria; *status* de pulverização; horizonte artificial; bússola com indicação de rumo; além de informações de altura, velocidade, tempo de voo, distância em relação ao ponto de decolagem e a imagem da câmera frontal.

### **3.3 Identificação das tarefas e cenários**

#### **3.3.1 Condições normais de operação**

Como já mencionado, o objetivo dos experimentos é obter dados que permitam avaliar, de maneira representativa, o impacto na carga de trabalho mental de pilotos da variação do número de RPAs sob sua supervisão em operações de pulverização agrícola. Dessa forma, a escolha dos cenários testados e das tarefas executadas pelos pilotos foi feita de forma a simular, da melhor maneira possível e considerando os equipamentos disponíveis, as demandas e situações (normais e anormais) que um piloto de RPAS encontraria nesse tipo de operação em condições reais.

O primeiro passo para a construção do experimento foi a identificação e detalhamento das tarefas efetuadas por um piloto remoto em uma operação convencional de pulverização de RPAS com alto grau de automatização. Essa identificação foi feita a partir de observações de operações e entrevistas com pilotos e engenheiros envolvidos no desenvolvimento das funções do sistemas voltadas para a interação homem-máquina.

Para esse levantamento foram consideradas tarefas de interesse (ou primárias) apenas aquelas especificamente relacionadas à pilotagem da RPA e necessárias para o cumprimento da missão ou para a garantia da segurança do voo. Demais tarefas da operação não relacionadas ao voo e que, portanto, não requerem a experiência ou o treinamento de pilotos para serem executadas, como a preparação do insumo e a verificação de demais equipamentos de solo, não fizeram parte do escopo. Determinou-se que essas tarefas, quando necessárias durante o voo, seriam executadas por terceiros. Além disso, tarefas relacionadas ao voo mas não essenciais para o cumprimento da missão ou para a garantia da segurança da operação também ficaram do escopo. Estas tarefas estão, muitas vezes, ligadas à falta de procedimentos padrões para pilotagem e sistematização de treinamentos, surgindo, por exemplo, como vícios dos pilotos.

Assim, definiu-se que, em condições normais de operação, o piloto é responsável pela execução de duas tarefas primárias durante o voo. Em primeiro lugar, cabe a ele monitorar, a cada certo intervalo de tempo, determinados parâmetros da RPA através da GCS. A segunda tarefa essencial é verificar, através de linha de visada direta, a posição da RPA em voo. Ambas tarefas estão detalhadas a seguir.

No que diz respeito a primeira tarefa, dentre todos os parâmetros disponíveis na GCS (*vide* Seção 3.2.2), apenas alguns foram considerados essenciais para que o piloto seja capaz

de avaliar com segurança a condição de voo da RPA. Em outras palavras foi determinado que, checando esses parâmetros, o piloto é capaz de julgar, com a segurança requerida pelo nível de risco da operação, se a RPA está se comportando e executando a missão conforme o planejado. Esses parâmetros são:

- velocidade indicada da RPA;
- altura em relação ao solo;
- distância horizontal em relação ao ponto de decolagem; e
- posição da aeronave no mapa.

No experimento, portanto, foi solicitado que os participantes checassem apenas esses parâmetros na tela do simulador para cada RPA sob sua supervisão. Já o intervalo de tempo considerado adequado e o que foi solicitado no experimento foi o de 30 s entre as verificações de cada RPA. Esse intervalo foi determinado majoritariamente a partir da observação de operações reais de pulverização e entrevistas com pilotos mais experientes. Para garantir a execução dessas tarefas na frequência adequada, um sinal sonoro era emitido a cada 30 s para o participante que, após checar todos os parâmetros de cada RPA, devia fazer uma marca em uma ficha apropriada (*vide* Apêndice B.1). O intuito da ficha era apenas garantir a execução das tarefas solicitadas, portanto os participantes foram instruídos a fazer marcas simples em locais previamente indicados e facilmente identificáveis de forma a interferir o mínimo possível na carga de trabalho mental avaliada.

É importante ressaltar que, durante a tarefa de monitoramento, não foi feita nenhuma restrição quanto a verificação de outros parâmetros na tela da GCS – alguns pilotos, devido às suas experiências pessoais, verificavam outras informações, como a taxa de variação da atitude da aeronave. No entanto, como essa tarefa não foi identificada como primária, era esperado que, em caso de aumento da carga de trabalho, os pilotos deixassem de realizá-las para executar as tarefas primárias, isto é, aquelas explicitamente solicitadas.

Já a outra tarefa primária identificada, *i.e.*, a verificação da RPA através da linha de visada direta, não pôde ser introduzida diretamente no experimento dadas as limitações do ambiente simulado. Contudo, identificou-se que o intuito principal dessa tarefa é aumentar a margem de segurança da operação, permitindo ao piloto comparar os dados apresentados na tela com a condição real de voo da aeronave (*i.e.*, posição, altitude, qualidade do guiamento, *etc.*). Adotando, portanto, uma premissa de relativa alta confiabilidade na integridade das funcionalidades do sistema, o que é razoavelmente esperado para operações envolvendo múltiplas aeronaves, essa segunda tarefa poderia ser abandonada sem maiores prejuízos. A partir dessa consideração, optou-se por não introduzir tarefas análogas no experimento, que representariam a carga de trabalho necessária para a verificação em linha de visada direta. Em outras palavras, considerou-se que,

em uma operação típica com múltiplas RPAs de pulverização, essa tarefa não seria necessária. Além disso, a não introdução do acompanhamento através da linha de visada direta faz com que o experimento englobe também, em termos de tarefas executadas e carga de trabalho, operações fora da linha da visada (*vide* Seção 2.2).

### 3.3.2 Condições anormais e de emergência

No que concerne as tarefas realizadas pelo piloto em condições anormais e de emergência, a identificação de quais seriam introduzidas no experimento foi menos direta, uma vez que cada condição requer uma resposta específica do piloto. Essas respostas estão contidas nos procedimentos anormais e de emergência do sistema, que são uma lista de resposta do piloto a possíveis falhas ou situações anormais que o histórico de ocorrências e análises de engenharia indicam que podem acontecer em uma operação. Essa lista contém descrições, para cada situação, de como o piloto detecta cada condição e qual o procedimento detalhado é recomendado para ser executado (consultar Seção 2.2.4.1). Esses procedimentos fazem parte do treinamento dos pilotos para operar cada RPAS.

Para contornar esse problema e definir um escopo viável para o experimento, uma vez que seria impossível testar todos os casos, foram definidos critérios para elencar aquelas ocorrências consideradas mais relevantes para os objetivos do trabalho. O critério escolhido foi selecionar as situações anormais e de emergência: (i) mais comuns durante uma operação (baseando-se na experiência de operadores); e (ii) com o potencial de ter a consequência mais severa para a segurança da operação, desde que razoavelmente esperadas de ocorrer (consultar Seção 2.2.4).

Pelo segundo critério apresentado, o procedimento identificado como mais relevante para o experimento foi a resposta a um aeronave invasora, o que, em caso de colisão, poderia resultar em fatalidades. O procedimento padrão adotado nessa situação consiste no piloto, após a detecção da presença de uma ou mais aeronaves não envolvidas na operação de pulverização próximas ao volume de voo da RPA sob seu controle, acionar o modo de voo PARAR (consultar Seção 3.2.1), fazendo com que a RPA permaneça em voo pairado, e monitorar o voo da(s) aeronave(s) invasora(s). Caso o piloto perceba a possibilidade de colisão ele deve acionar o modo de voo POUSAR (consultar Seção 3.2.1). Caso contrário, ele deve aguardar a(s) aeronave(s) se afastar(em) até uma distância segura e acionar o modo RETORNAR (consultar Seção 3.2.1), para que a RPA volte para pouso e o piloto possa tomar as demais medidas necessárias para garantir a segurança do restante da operação. A detecção da aeronave invasora pode ser feita tanto através da linha de visada direta quanto a partir da identificação do som da aeronave próxima.

Para simular essa ocorrência, uma aeronave invasora foi inserida no ambiente simulado, com sua trajetória sendo controlada externamente. Essa aeronave aparecia na(s) tela(s) da(s) GCS, podendo ter sua posição acompanhada pelo participante. Para permitir a detecção da aeronave pelo participante com uma distância em relação ao volume de voo da RPA semelhante

ao que seria esperado de situações reais, um som de aeronave com intensidade gradual era emitido no ambiente, simulando a aproximação da aeronave invasora – o estímulo sonoro era mantido enquanto a aeronave invasora permanecesse próxima a região de voo das RPAs, isto é, a região apresentada na tela do piloto. Dessa forma, o participante detectava a aeronave invasora primeiro pelo estímulo sonoro e, em seguida, monitorava sua posição através da(s) tela(s) da(s) GCS. O procedimento de resposta era executado conforme descrito no parágrafo anterior para cada RPA. A rota realizada pela aeronave invasora era aleatória, variando de etapa para etapa. Contudo, o controlador da aeronave externa era sempre instruído a entrar gradualmente no espaço “visível” da tela da RPS do participante, de maneira a garantir a detecção em tempo de executar o procedimento.

Pelo critério de ocorrências mais comuns, por sua vez, foram selecionados os casos de falta de insumo, erro de solução de posicionamento e falha no controlador. Considerando as funcionalidades de mitigação de falhas disponíveis no sistema simulado (*vide* Seção 3.2.1), a resposta do piloto para os casos de fim de insumo e erro no controlador, para fins desse experimento, cobrem também uma série de outras ocorrências, uma vez que o procedimento a ser executado é muito semelhante. Em todos esses casos, a condição de falha é detectada automaticamente pelo sistema, que emite um alerta na GCS para o piloto e aciona o modo RETORNAR (consultar Seção 3.2.1), para pousar a RPA em segurança. A tarefa do piloto durante o voo da aeronave é, portanto, basicamente monitorar, através da GCS e da linha de visada direta com a RPA, a trajetória de voo e do pouso, que são automatizadas. Esse monitoramento é realizado para que, caso a RPA apresente algum comportamento não esperado na trajetória de retorno (resultante ou não do caso de falha), o piloto possa intervir, enviando comandos (*e.g.*, pousar no local).

Já para o caso da falha na solução de posicionamento o procedimento é um pouco distinto, uma vez que o piloto não é capaz de acompanhar o voo da RPA pela tela da GCS e nem de enviar comandos para a aeronave. Nessa situação, cabe ao piloto verificar se a comunicação foi reestabelecida e, se possível, acompanhar através da linha de visada direta a trajetória de retorno. O acompanhamento visual em voos com apenas uma aeronave, nesse caso, serve principalmente para alertar pessoas próximas em caso de falha na resposta de pouso automatizado, *i.e.*, a RPA continua voando desgovernadamente. Por se tratar de um cenário complexo envolvendo, pelo menos, mais uma falha do sistema (além da perda de comunicação) e que não está relacionada diretamente com a carga de trabalho do piloto durante a pilotagem da RPA, a tarefa de acompanhamento através da linha de visada direta não foi considerada.

Em voos envolvendo mais de uma aeronave por piloto remoto, o acompanhamento através da linha de visada direta é necessário para evitar colisões entre as aeronaves sob a supervisão do piloto. Nesse caso, o procedimento realizado pelo piloto nas aeronaves ainda sob seu controle seria equivalente ao procedimento de aeronave invasora descrito anteriormente. Para simular essa condição, dado que o acompanhamento através da linha de visada direta não era

possível, nos casos de múltiplas RPAs, o piloto era capaz de acompanhar a trajetória da aeronave sem comunicação na tela das GCS demais RPAs ainda sob seu comando.

Tanto o cenário de perda de solução de posicionamento quanto os outros casos de falha listado foram introduzidos no experimento. Como os procedimentos a serem executados pelo piloto após a correta detecção da falha são relativamente simples (*i.e.*, ativação de um procedimento de emergência ou apenas o monitoramento da aeronave), julgou-se que o ponto mais importante para a carga de trabalho mental do piloto nesses cenários é a correta identificação do caso de falha e do procedimento correspondente a ser executado.

Assim, a tarefa proposta para os participantes foi: após a ocorrência da falha eles deveriam selecionar, em uma ficha, a descrição que correspondia ao procedimento correto que deveria ser executado em uma operação real caso aquela falha específica fosse detectada (*vide* Apêndice B.2). A ficha apresentada continha, em forma de alternativas, os procedimentos para os três casos propostos, cabendo ao participante escolher qual era o aplicável para a falha detectada – a detecção da falha se dava através de alertas na GCS. A ficha e as opções eram previamente apresentadas para o piloto, que deveria apenas marcar, da maneira mais simples possível, uma entre três alternativas. Após a identificação, os pilotos deveriam manter o monitoramento e, após o pouso automático, reiniciarem as missões.

A Tabela 1 da Seção 3.1 apresenta um resumo da distribuição dos cenários propostos para o experimento, conforme descritos nos últimos parágrafos.

### **3.4 Participantes**

Para participar do experimento foram convidados pilotos de RPAS de pulverização com diferentes níveis de experiência. Ao todo, cinco pilotos aceitaram colaborar com o estudo. Todos os pilotos tinham experiência com o sistema simulado, isto é, o STRATUS H12®, da fabricante brasileira ARYS Tecnologia Embarcada Ltda.<sup>[61]</sup>. A Tabela 3 apresenta a idade, o tempo de experiência trabalhando com RPAS de pulverização e o número máximo de operações por semana dos pilotos participantes. A participação no estudo foi voluntária e todos os pilotos assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido para a participação (*vide* Apêndice A).

A idade média dos participantes foi de 26,8 anos, com desvio padrão de 2,6. A faixa etária do estudo foi de 23 anos até 30 anos. Já a experiência média foi de 2,3 anos, com desvio padrão de 1,3. O piloto mais experiente tinha 4 anos de experiência com pilotagem de RPAS de pulverização e o menos experiente tinha 7 meses de experiência com pilotagem. Por fim, a frequência máxima de operações semanais variou entre 3 e 6 dias na semana.

Três dos cinco participantes eram pilotos de ensaio em voo da fabricante do sistema. Dos restantes, um era engenheiro de ensaios em voo também da fabricante e o outro representante comercial de uma empresa que atua na área agrícola e também professor em um curso de RPAS de pulverização. Todos estavam ativos na pilotagem de RPAS de pulverização no período do

Tabela 3 – Informações dos pilotos participantes

ID Piloto	Idade	Experiência com pulverizadores	Frequência máxima de operação semanal
P1	26 anos	7 meses	3 dias
P2	27 anos	2 anos	3 dias
P3	28 anos	3 anos	5 dias
P4	23 anos	2 anos	6 dias
P5	30 anos	4 anos	6 dias

Fonte: Elaboração própria.

ensaio. Além disso, antes da realização do experimento, todos se declaram em boas condições físicas e mentais, com sono regular e não reportaram fadiga (emocional ou física) ou ansiedade.

### 3.5 Equipamentos

Nessa seção estão descritos os equipamentos utilizados para a realização dos experimentos com os pilotos.

#### 3.5.1 Simulador

O simulador utilizado no experimento é composto por *hardware* e *software*, conforme descrito nas subseções a seguir.

##### 3.5.1.1 *Hardware*

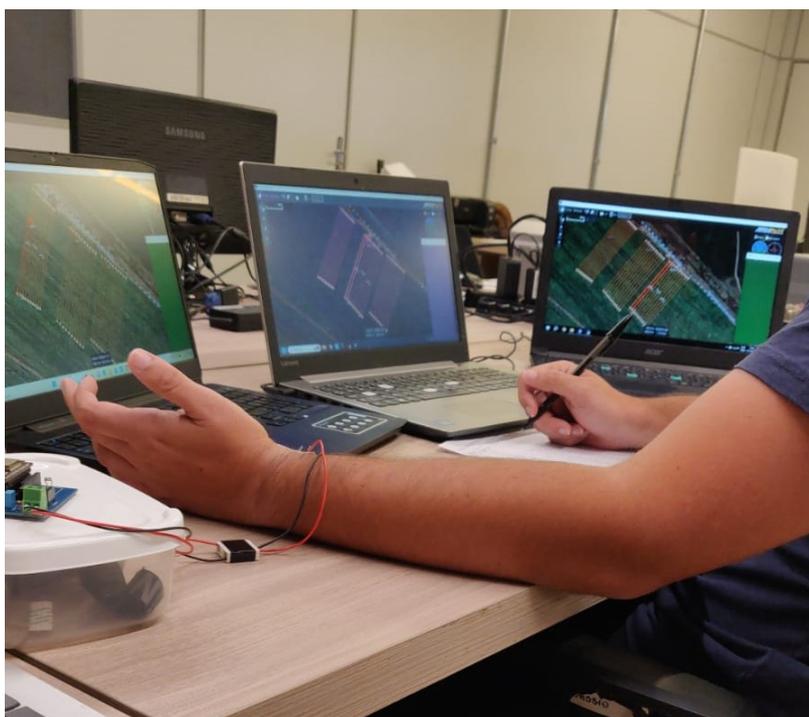
No que diz respeito ao *hardware* que compõe o simulador, *notebooks* comerciais foram utilizados para fazer o papel das estações de controle – cada RPA simulada sob a supervisão do participante era comandada por um *notebook*. Nesses *notebooks* estava instalado o *software* de planejamento, monitoramento e controle de voo das aeronaves simuladas, como descrito na Seção 3.5.1.2. Vale ressaltar que alguns RPAS de pulverização ou mapeamento de áreas agrícolas utilizam ou podem utilizar, em operações normal, *notebooks* como estação de controle – como é o caso do STRATUS H12® (consultar Seção 3.2.2). Para o estudo, todos os pilotos participantes já possuíam experiência prévia com operações nessa configuração.

Ressalta-se que a principal desvantagem do uso de *notebooks* em relação aos controles portáteis nas operações de RPAS de pulverização é a ausência de *joysticks* para controle mais preciso do deslocamento e posição da RPA. Como esse tipo de tarefa não está sendo considerada no experimento, não houve prejuízo em termos de carga de trabalho na utilização dos *notebooks*.

Durante os ensaios, o piloto participante permanecia sentado em uma cadeira diante de uma mesa onde estavam dispostos os *notebooks*. O número de *notebooks* posicionados a frente do

piloto era equivalente ao número de RPAs sob sua supervisão para cada etapa do experimento. O participante ajustava a cadeira e a posição do(s) *notebook(s)* conforme julgava mais confortável e de maneira a facilitar todas as ações necessárias no experimento – *i.e.*, monitoramento, marcações nas fichas e procedimentos de emergência. Os botões do *notebook* utilizados como atalho para a alteração dos modos de voo foram destacados para facilitar a identificação por parte do piloto. A Figura 17 a seguir mostra um dos participantes realizando o experimento no simulador em uma etapa em que era necessária a supervisão simultânea de três RPAs.

Figura 17 – Participante executando o experimento: supervisão de três RPAs simultaneamente.



Fonte: Elaboração própria.

Além disso, um outro *notebook* era utilizado para o gerenciamento do ambiente da simulação, controle da aeronave invasora e configuração das missões e das RPAs de pulverização. Esse *notebook* era operado por um engenheiro da empresa parceira, responsável pela disponibilização e configuração do simulador, que auxiliou na organização do experimento e ficava sentado em uma mesa afastada da mesa do participante. Por fim, esse *notebook* também foi usado para emitir o som simulado da aeronave invasora para o experimento.

### 3.5.1.2 Software

Foi utilizado para a simulação o ambiente ArduPilot *Software In The Loop* (STIL), disponibilizado pela biblioteca do projeto ArduPilot<sup>[42]</sup>. Esse ambiente permite o envio comandos de pilotos e outras entradas para modelos de dinâmica de voo de veículos não tripulados, isto é, modelos que simulam o comportamento dinâmico de RPAs reais em voo. A partir desses dados de entrada, os modelos geram dados de resposta do sistema e os parâmetros físicos relacionados

ao movimento dos veículos (*i.e.*, *status* de sistemas, posição, velocidade, *etc.*) que realimentam o modelo e são disponibilizados para o piloto, conforme ocorre em operações reais.

Os modelos de dinâmicas de voo, ou aeronaves virtuais, são desenvolvidos também com base nos *firmwares* disponibilizados pela biblioteca do ArduPilot<sup>[42]</sup>, sendo os mesmos usados para o desenvolvimento do RPAS STRATUS H12®, sistema utilizado como base para o experimento. Além disso, as aeronaves virtuais tiveram seus parâmetros de voo (*i.e.*, velocidade de pulverização, velocidade de deslocamento, altura de pulverização, *etc.*) configurados para representar esse sistema, conforme dados disponibilizados pelo fabricante. Já a aeronave invasora foi configurada baseando-se aproximadamente em parâmetros da aeronave agrícola Ipanema EMB-203.<sup>[75]</sup>

A interface com o piloto, ou seja, o *software* de planejamento, monitoramento e controle de voo utilizado para completar a simulação foi o QGroundControl<sup>[43]</sup>, mesmo utilizado no sistema STRATUS H12®. Para permitir a interação entre os notebooks durante o experimento, o ambiente de simulação foi instalado em um servidor *online* e todos os usuários se conectaram a esse servidor por meio de uma VPN, permitindo ter todos os computadores em uma mesma rede. Cada aeronave era comandada por um *notebook*, mas todas as aeronaves eram visíveis em cada uma das telas dos computadores conectados na rede através do QGroundControl<sup>[43]</sup>.

Para introduzir, no momento planejado, as condições de falha previstas para o experimento (*i.e.*, falta de insumo, erro de solução de posicionamento ou falha no controlador) e apresentar o alerta referente a essa falha, foi utilizado um *script* em Phyton. Esse *script* enviava um comando de retorno para pouso para aeronave em falha e fazia aparecer o alerta na tela para o piloto, conforme uma contagem de tempo previamente programada.

A falha de comunicação, por sua vez, foi simulada interrompendo o *link* de conexão entre o *notebook* e a respectiva aeronave que estava sendo controlada por ele. Dessa forma, a RPA que teve sua comunicação perdida aparecia com a posição congelada na tela do *notebook* que apresentou a perda da comunicação. Nas demais telas, contudo, ainda era possível visualizar o deslocamento da RPA que perdeu a comunicação em direção ao pouso. Essa falha era introduzida através do computador de gerenciamento. Por fim, o *script* em Phyton também foi utilizado para permitir o envio de comandos para a RPA pelo teclado – *i.e.*, permitia o funcionamento dos atalhos no teclado para ativação dos procedimentos de segurança

### 3.5.2 Sensor de atividade eletrodérmica (EDA)

Para complementar os dados subjetivos, foi utilizado um sensor de atividade eletrodérmica (EDA, do termo em inglês *electrodermal activity*). Esse sensor é capaz de medir alterações nas características elétricas da pele, que são afetadas pelo estado das glândulas sudoríparas da região examinada. Essas glândulas, por sua vez, são controladas pelo sistema nervoso simpático, que é o responsável por comandar as respostas do corpo a alterações na carga de trabalho mental. Em termos gerais, o aumento da carga de trabalho provoca um aumento na condutância da

pele.<sup>[76]</sup>

O sinal mensurado da condutância da pele é composto por duas partes, uma componente tônica e outra fásica. A componente tônica caracteriza uma resposta mais lenta, que aumenta com o acúmulo de suor e a hidratação da pele. Essa componente pode ser um bom representativo da carga mental geral, isto é, a carga ao longo de toda a tarefa, porém, ela também é mais influenciada por fatores externos ao experimento, como a temperatura do ambiente. A componente fásica, por outro lado, reflete a resposta dos poros a eventos específicos durante a tarefa que provocam uma excitação momentânea no indivíduo, como um rápido aumento na carga de trabalho mental ou algum evento não esperado pelo indivíduo.<sup>[77][76]</sup>

O sensor utilizado para a aquisição dos dados foi um protótipo disponibilizado pelo Laboratório Aeronáutico de Tecnologias (AeroTech) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Esse protótipo foi desenvolvido para um estudo de classificação de crises epilépticas também em parceria com o Centro de Cirurgia de Epilepsia (CIREP) do Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto (HCFMRP).<sup>[78]</sup>

O sensor é integrado a uma placa de circuito impresso que era alimentada por um *notebook* comercial através da entrada USB. Esse *notebook* também era utilizado para armazenar os dados do capturados pelo sensor. Para as leituras do sensor eram utilizados dois eletrodos auto-adesivos com gel fixados lado a lado no pulso do indivíduo em contato com a pele. A medição da capacitância é feita em microsiemens ( $\mu S$ ) e a frequência de aquisição de dados é de 1 Hz.

Durante as medições, os eletrodos do sensor eram colocados no pulso esquerdo do participante, que permanecia parado. Dessa forma, todas as tarefas necessárias eram executadas pelo piloto com a mão direita – destaca-se que todos os participantes tinham a preferência em usar a mão direita (*i.e.*, destros). A placa com o sensor foi posicionada ao lado do participante, conectada ao *notebook* que armazenava os dados. Nesse *notebook* também era comandado o início e fim das leituras.

Para analisar os dados de condutância da pele obtidos foi utilizado o *software* de código aberto Ledalab.<sup>[79]</sup> Esse *software* permite a decomposição do sinal de condutância da pele nas componentes fásica e tônica, o que possibilita, como já mencionado, extrair as características da resposta de condutância da pele. A partir desse *software* também foi possível realizar um pré-processamento nos dados mensurados, que foram suavizados e otimizados para reduzir a influência de erros de medição – causados, por exemplo, por ruídos eletrônicos e variações no contato entre a pele e os eletrodos devido a movimentos do participante.

O método de decomposição escolhido para o tratamento dos dados nesse estudo foi a análise de decomposição contínua (CDA, do termo em inglês *continuous decomposition analysis*), que é o mais recomendado pelos desenvolvedores do *software* para a análise da dados de condutância da pele. Com esse método, os dados são decompostos em curvas contínuas das

componentes, a partir das quais são calculadas as médias para a comparação da carga de trabalho. [80]

### 3.6 Escalas subjetivas

Duas escalas subjetivas de avaliação de carga de trabalho foram utilizadas no experimento. O método *Instantaneous Self Assessment* (ISA), ou, em tradução livre para o português, Autoavaliação Instantânea foi escolhido por sua simplicidade, baixo custo, facilidade de aplicação e, principalmente, pela sua relativa baixa intrusividade, permitindo uma avaliação rápida em diversas ocasiões do experimento e com a tarefa ainda muito recente na memória de trabalho do participante. Além disso, essa metodologia foi desenvolvida para avaliar a carga de trabalho de controladores de tráfego área durante suas tarefas<sup>[81]</sup>, que são muito similares aquelas esperadas para piloto de múltiplos RPAs (consultar Seção 2.3.5).

Por outro lado, com o intuito de obter uma avaliação mais compreensiva, principalmente levando em conta as diferentes dimensões da carga de trabalho e como elas podem ser afetadas pela introdução de mais RPAs sob a supervisão do piloto, optou-se também pela utilização da *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* (NASA-TLX), ou, em tradução livre para o português, Índice de Carga de Tarefa NASA. Cada um dos dois métodos utilizados no experimento estão descritos nas subseções a seguir.

#### 3.6.1 *Instantaneous Self Assessment* (ISA)

A ISA é uma técnica subjetiva de avaliação de carga de trabalho mental baseada em uma escala unidimensional. Como já mencionado, esse método foi desenvolvido com o intuito de avaliar a carga de trabalho percebida por controladores de voo durante a realização das tarefas. Se trata de um método pouco intrusivo e de aplicação e simples e rápida, utilizado principalmente para quantificar subjetivamente as alterações na carga de trabalho ao longo de uma determinada tarefa a partir de diversas mensurações de carga de trabalho percebida em diferentes momentos da execução da tarefa.<sup>[82]</sup>

A escala ISA conta com cinco níveis de carga de trabalho global percebida, que variam de 1 a 5. A cada nível são associados termos caracterizadores que representam a carga de trabalho percebida e a “quantidade de capacidade restante” para a execução de tarefas, além de uma descrição do que representa aquele nível em termos de percepção do indivíduo em relação à execução das tarefas e ao tempo disponível. A Tabela 4 apresenta a escala ISA com os níveis e termos caracterizadores.

A escala é apresentada ao indivíduo durante ou imediatamente após a realização de determinada tarefa, para que este possa avaliar qual o nível de carga de trabalho percebida durante aquela tarefa ou etapa da tarefa. Dessa forma, uma outra vantagem desse método é que o indivíduo realiza a classificação da carga de trabalho percebida com as experiências e sensações

Tabela 4 – Escala ISA com descrição.

Nível	Carga de trabalho	Capacidade restante	Descrição
1	Subutilizada	Muitíssimo	Nada pra fazer. Entediante.
2	Relaxada	Ampla	Tempo mais que suficiente para todas as tarefas. Ativo nas tarefas em menos que 50% do tempo disponível.
3	Confortável	Alguma	Todas as tarefas sob controle. Ocupado, porém em um ritmo estimulante. Poderia se manter nesse nível continuamente.
4	Alta	Muito pouca	Tarefas não essenciais prejudicadas. Não poderia trabalhar nesse nível por muito tempo.
5	Excessiva	Nenhuma	Não consegue completar todas as tarefas; perdendo o controle da situação

Fonte: Adaptado de Kirwan *et al.*<sup>[83]</sup>

ainda recentes na memória, dando maior representatividade ao resultado. A ficha utilizada para a aplicação da escala ISA durante o experimento está apresentada no Apêndice B.3

### 3.6.2 NASA Task Load Index (NASA-TLX)

A escala NASA-TLX é uma técnica amplamente utilizada para a avaliação da carga de trabalho mental dos mais variados tipos de tarefas.<sup>[82]</sup> Essa escala parte do princípio de que a carga de trabalho mental não depende apenas dos requisitos da tarefa, mas também das condições em que essa tarefa é executada, assim como das habilidades comportamentos e percepções do indivíduo que a executa. Para capturar as interações entre esses aspectos, essa metodologia propõe a determinação de carga de trabalho global a partir da avaliação de seis subescalas, cada uma representando os diferentes fatores que compõem a carga de trabalho.<sup>[84]</sup>

Desses seis fatores, ou dimensões da carga de trabalho, três deles estão relacionados com os tipos de demandas impostas ao indivíduo pela tarefa, sendo estes: demanda física, demanda mental e demanda temporal. Os outros três, por sua vez, estão relacionados às interações entre o indivíduo e a tarefa, sendo eles: esforço, frustração e desempenho. A Tabela 5 contém descrições mais detalhadas do que representa, para o indivíduo que executa a tarefa, cada uma das seis dimensões de carga de trabalho mental que compõem a escala NASA-TLX.<sup>[84]</sup>

Para a determinação da carga de trabalho global, o indivíduo, após a realização da tarefa, avalia a magnitude do impacto da tarefa em cada um dos seis fatores. Esse impacto é avaliado através da marcação de um valor entre 0 e 100 em uma subescala contida em uma ficha de classificação, onde 0 e 100 representam os extremos apresentados na Tabela 5. Uma média ponderada é, então, feita entre as magnitudes de cada escala para a obtenção de um valor carga de trabalho global entre 0 e 100.

Tabela 5 – Definições das dimensões da carga de trabalho e extremos das subescalas NASA-TLX

<b>Dimensão</b>	<b>Extremos</b>	<b>Descrição</b>
Demanda mental	Muito baixo/ Muito alto	Quanta demanda mental e atividade de percepção foi exigida ( <i>e.g.</i> , pensar, decidir, calcular, lembrar, olhar, procurar, identificar, comparar, <i>etc.</i> )? A tarefa foi simples ou complexa, fácil ou difícil, exigente ou tranquila?
Demanda física	Muito baixo/ Muito alto	Quanta atividade física foi requerida ( <i>e.g.</i> , empurrar, puxar, girar, controlar, ativar, <i>etc.</i> )? A tarefa foi fácil ou difícil, lenta ou rápida, tranquila ou extenuante, sossegada ou trabalhosa?
Demanda temporal	Muito baixo/ Muito alto	Quanta pressão de tempo você sentiu devido ao ritmo da tarefa/elementos da tarefa? O ritmo foi lento e vagaroso ou rápido e frenético?
Desempenho	Muito bom/ Muito ruim	Quão bem sucedido você acredita que foi em alcançar os objetivos da tarefa definidos pelo instrutor? E os definidos por você? Quão satisfeito você ficou com seu desempenho em alcançar esses objetivos?
Esforço	Muito baixo/ Muito alto	Quão arduamente você teve que trabalhar (mentalmente e fisicamente) para alcançar o nível de desempenho apresentado?
Nível de frustração	Muito baixo/ Muito alto	Quão inseguro, desencorajado, irritado, estressado e incomodado versus seguro, gratificado, contente, relaxado e complacente você se sentiu durante os testes?

Fonte: Adaptado de Hart e Staveland<sup>[84]</sup>

Nesse média, os fatores de ponderação também são determinados pelos indivíduos que executam a tarefa. Para isso, os indivíduos comparam dois a dois cada um dos seis fatores, escolhendo, para cada comparação, qual fator que representa a contribuição mais importante para a carga de trabalho da tarefa executada – ao todo, são 15 comparações entre os seis fatores. Para essas comparações, os fatores são apresentadas dois a dois, para que o indivíduo selecione aquele entre os dois apresentados que representa a maior contribuição para a carga total. O peso de cada dimensão da carga de trabalho na média ponderada é determinado pela soma do número de vezes que o fator foi escolhido nas comparações. Esses pesos, portanto, representam a contribuição de cada dimensão para a carga de trabalho total da tarefa do ponto de vista do indivíduo que a executou.

Vale destacar que, enquanto as avaliações de magnitude devem ser realizadas para cada tarefa ou conjunto de tarefas que se deseja determinar a carga de trabalho global, a determinação dos pesos dos fatores pode ser feito apenas uma vez para diferentes variações de uma mesma tarefa, desde que seja considerado que as contribuições de cada um dos pesos sejam razoavelmente similares nas diferentes versões.

A escala NASA-TLX é, portanto, uma técnica de fácil aplicação e proporciona uma relativa riqueza de informações para o estudo, uma vez que coleta dados dos impactos na carga de trabalho dos diferentes fatores que a compõem. Dentre as limitações dessa escala cita-se o possível impacto da memória do indivíduo para a avaliação, uma vez que seis escalas devem ser avaliadas após a execução das tarefas; a ausência de linhas de referência para a análise dos valores absolutos encontrados; e, por fim, a dificuldade para a obtenção dos pesos, uma vez que a comparação entre as escalas pode ser uma atividade muito abstrata.<sup>[85][86]</sup>

A ficha utilizada para a aplicação da escala NASA-TLX durante o experimento está apresentada no Apêndice B.5

### **3.7 Missões simuladas**

As missões executadas pelos participantes foram missões típicas do sistema simulado (consultar Seção 3.2). Como o escopo do estudo era a avaliação da carga de trabalho dos pilotos durante o voo da RPA (e não em outras fases da operação) e considerando a importância da padronização das tarefas e suas condições de realização para a comparação de medições de carga de trabalho, o planejamento das missões executadas pelos pilotos no simulador foi feito com antecedência pelos responsáveis pelo experimento, não sendo responsabilidade dos participantes.

As missões consistiram em polígonos de voo simples, com no máximo 10.000 ha. Cada RPA, sempre que era utilizada, executava uma mesma missão, planejada sobre uma área rural. As missões foram planejadas para durar aproximadamente 6 minutos, considerando as características de aplicação e dinâmica de voo da aeronave. Os polígonos das missões das diferentes RPAs foram dispostos de forma a não haver interseção quando as três RPA voavam simultaneamente, porém, os pontos de decolagem foram posicionados relativamente próximos, como seria esperado de uma operação desse tipo em uma situação real – essa disposição evita a pulverização de uma mesma faixa duas vezes e a movimentação excessiva dos operadores na preparação da missão. Além disso, as missões foram planejadas de maneira que todas as RPAs estivessem acessíveis ao campo de visão do piloto a qualquer momento do voo.

Outro ponto relacionado ao planejamento das missões foi que, em etapas com mais de uma aeronave, as missões de cada RPA foram planejadas para que os deslocamentos até a área de interesse e os retornos para pouso de cada RPA fossem realizados em alturas distintas (3m, 8m e 13m). Isso foi feito para evitar o risco de colisão entre as RPAs nesses deslocamentos devido a proximidade dos pontos de decolagem (cerca de 10 m de separação). Além disso, as missões planejadas não consideraram obstáculos dentro das áreas de voo – fora do escopo do teste devido a limitações do simulador. Contudo, uma vez que adotou-se como premissa que o sistema seria capaz de detectar e evitar obstáculos de forma automatizada, foi considerado que a ausência de missões com obstáculos não causaria um impacto significativo na carga de trabalho avaliada.

### 3.8 Procedimentos

Nessa seção está apresentado o passo a passo para a execução dos experimentos de avaliação de carga de trabalho.

#### 3.8.1 Preparações iniciais e familiarização

A primeira etapa do ensaio era a preparação do local de teste. Nessa fase, toda a infraestrutura para o ensaio era preparada, isto é, mesas e cadeiras preparadas, *notebooks* posicionados e preparados para o uso, servidor conectado, ambiente de simulação testados, *etc.* Além disso, a iluminação e a temperatura eram controladas (dentro das limitações do local disponível para os testes). No primeiro caso, todas as portas e cortinas da sala eram fechadas e todas as luzes acesas. Para a temperatura, o ar condicionado do ambiente era ligado e mantido em 21° C.

A próxima fase era a preparação do participante. Inicialmente, os participantes preenchiam uma ficha de registro com as informações necessárias para a identificação e dados demográficos – *i.e.*, nome, profissão, anos de experiência com a pilotagem de RPAS e frequência máxima de pilotagem em um período de uma semana. Vale destacar que os testes eram realizados individualmente.

Após o preenchimento da ficha, uma visão geral do experimento era apresentada para o participante. Nessa parte, o participante recebia informações a respeito dos objetivos gerais do experimento, além de uma descrição geral de todas as etapas e subetapas, assim como das ações esperadas dele em cada uma delas. Informações a respeito das metodologias de avaliação da carga de trabalho e da disposição e funcionamento dos equipamentos no local também eram apresentadas nesse momento.

Na sequência, era iniciada a familiarização do piloto com o simulador. Nessa etapa, todas as características do simulador eram apresentadas para o participante – *i.e.*, disposição das informações na tela, disposição dos *notebooks*, comandos no teclado, missões esperadas, *etc.* Vale lembrar que todos os pilotos participantes já tinham experiência prévia com o uso do *software* de planejamento de missão e monitoramento e controle de voo utilizado no simulador. Além disso, todos os participantes realizaram missões de familiarização com mais de uma RPA sob seu comando. Durante essas missões, as tarefas exigidas eram detalhadas, com a apresentação das fichas utilizadas e todas dúvidas sanadas.

Após a familiarização com o simulador, as técnicas de avaliação da carga de trabalho eram apresentadas com detalhe para o participante. Inicialmente, a escala ISA era detalhada e, em seguida, a escala NASA-TLX. Em ambos os casos, os níveis de cada escala eram descritos e cenários hipotéticos eram criados para exemplificar os níveis e auxiliar na compreensão. Além disso, para facilitar na familiarização com a escala NASA-TLX, por utilizar conceitos relativamente mais complexos, era solicitado que os participantes lessem um conjunto de instruções de introdução e utilização dessa metodologia de avaliação de carga de trabalho (*vide* Apêndice B.4).

Para completar a familiarização com o uso das técnicas de avaliação de carga de trabalho, uma atividade simples era proposta para o participante com o intuito de aplicar os conceitos apresentados. A atividade consistia em marcar, com um lápis, pontos no centro de cada célula de um papel quadriculado. Era dada a instrução de que os pontos deveriam ser o mais homogêneos e centralizados possível. Além disso, o participante tinha um tempo limite para preencher um certo número de células. Ao final da atividade, o participante deveria preencher as duas escalas de avaliação de carga de trabalho. A escolha de uma atividade que envolvia diferentes demandas foi feita para facilitar a compreensão do participante, principalmente em relação às diferentes dimensões de carga de trabalho exploradas na escala NASA-TLX. Durante o preenchimento das escalas, o participante foi incentivado a levantar quaisquer dúvidas e falar em voz alta suas considerações para cada dimensão, para garantir o entendimento. Por fim, destaca-se que os participantes tinham disponíveis, em todo momento do experimento, folhas com instruções de ambas técnicas utilizadas, para conferência, caso desejado.

As preparações para a aquisição dos dados eram finalizadas limpando-se o pulso do participante com álcool e fixando-se o sensor, com o participante já na posição para a realização do experimento.

### 3.8.2 Aquisição dos dados

Conforme já descrito, os ensaios contavam com 3 etapas, cada uma subdividida em mais 3 subetapas. Antes de cada subetapa, os pilotos recebiam uma descrição detalhada do cenário esperado e de todas tarefas e atividades que deveriam ser desempenhadas por ele naquela fase, incluindo: características da missão; instruções para o início e fim da subetapa; dados a serem monitorados e frequência de monitoramento; estímulos sonoros esperados; respostas a ocorrências, caso aplicável; e instruções para o preenchimento adequado das fichas. Além disso, também antes de cada subetapa, a ampliação dos mapas dos *softwares* eram ajustadas para um valor padrão. Essa ampliação era ajustada de forma a permitir a visão de todas as missões, no caso de três RPAs, e garantir uma visão adequada dos arredores das áreas de voo, considerando a potencial aeronave invasora.

O teste era iniciado com os participantes supervisionando apenas uma RPA e em um voo sem incidentes – primeira subetapa da etapa 1. Nesse caso, as tarefas do piloto eram: iniciar o voo; checar na tela da RPS, a cada 30 segundos e em resposta a um sinal sonoro, as informações solicitadas (*i.e.*, posição, velocidade, altura e distância do ponto de decolagem); assinalar a ficha adequada após a conclusão da verificação; e, com a missão finalizada, preencher a ficha com a escala ISA.

Já na segunda subetapa, ainda com uma única RPA sob supervisão, além das tarefas realizadas na subetapa anterior, o piloto também deveria responder a um evento de falha ocorrido durante o voo. O piloto não recebia informações prévias sobre qual falha seria simulada e nem o momento da ocorrência. A resposta consistia, de maneira geral, em identificar a ocorrência

---

através de um alerta que aparecia na tela da GCS; assinalar, na ficha adequada, o procedimento relacionado à ocorrência identificada; e, após o pouso da aeronave, reiniciar a missão. Destaca-se que, mesmo durante a resposta a ocorrência, a tarefa de monitoramento não era interrompida.

Na terceira e última subetapa da etapa 1, todas as tarefas da primeira subetapa também eram realizadas. Além disso, o participante deveria reagir a chegada de aeronave invasora: em um dado momento do voo, um estímulo sonoro contínuo era iniciado (simulando o som de um avião em voo), indicando a presença de uma aeronave invasora. Nesse momento, o piloto deveria executar o procedimento de resposta previamente instruído. Assim como na etapa anterior, o piloto não recebia informações com relação ao momento em que a invasão aconteceria. O participante também não tinha conhecimento quanto à trajetória da aeronave. Após o pouso da aeronave, o participante devia preencher a ficha com a avaliação da carga de trabalho (ISA) e o questionário mais detalhado (NASA-TLX). Ao final da primeira etapa, o participante também deveria fazer a comparação e classificações das dimensões de carga de trabalho da escala NASA-TLX, para a definição do peso de cada uma na soma da carga de trabalho.

Nas etapas subsequentes, isto é, etapas 2 e 3, as tarefas realizadas pelos pilotos em cada subetapa eram muito semelhantes as tarefas realizadas na etapa 1. A diferença era o número de aeronaves sob supervisão do piloto, duas e três, respectivamente, e as consequentes implicações relativas à essas novas condições. As tarefas de monitoramento, por exemplo, deveriam ser realizadas para todas as aeronaves, assim como o preenchimento da ficha de monitoramento. O mesmo vale para os procedimentos de aeronave invasora, que devia ser realizado em todas as aeronaves sob a supervisão do participante – caso ela se aproxime de alguma das aeronaves sob o controle do piloto, o modo pousar devia ser ativado apenas para aquela aeronave. Além disso, na subetapa 2, o evento de retorno para pouso ocorria em apenas uma RPA. Nesse caso, a rota de retorno poderia ou não invadir a área de voo de outra aeronave – em caso de invasão, o procedimento de aeronave invasora devia ser executado somente para a aeronave da missão invadida. Por fim, a ordem de preenchimento das fichas de avaliação era mantida.

Após o fim do último pouso, o simulador era desligado e o sensor desconectado no piloto. Os dados do sensor eram armazenados com a devida identificação e as fichas recolhidas e também identificadas.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo estão apresentados os dados obtidos durante os testes de avaliação de carga de trabalho mental descritos no capítulo 3, assim como as análises e discussões que envolvem esses valores. Os resultados estão dispostos em diferentes sessões. Inicialmente, são descritos e discutidos os dados obtidos com a escala ISA, seguido pelos dados e discussões da escala NASA-TLX e de uma comparação entre essas duas escalas. Por fim, são expostos os resultados do sensor EDA. O objetivo das análises e discussões é avaliar o impacto na carga de trabalho gerado pelo aumento do número de aeronaves não tripuladas sob a supervisão de um piloto remoto no ambiente simulado.

### 4.1 ISA

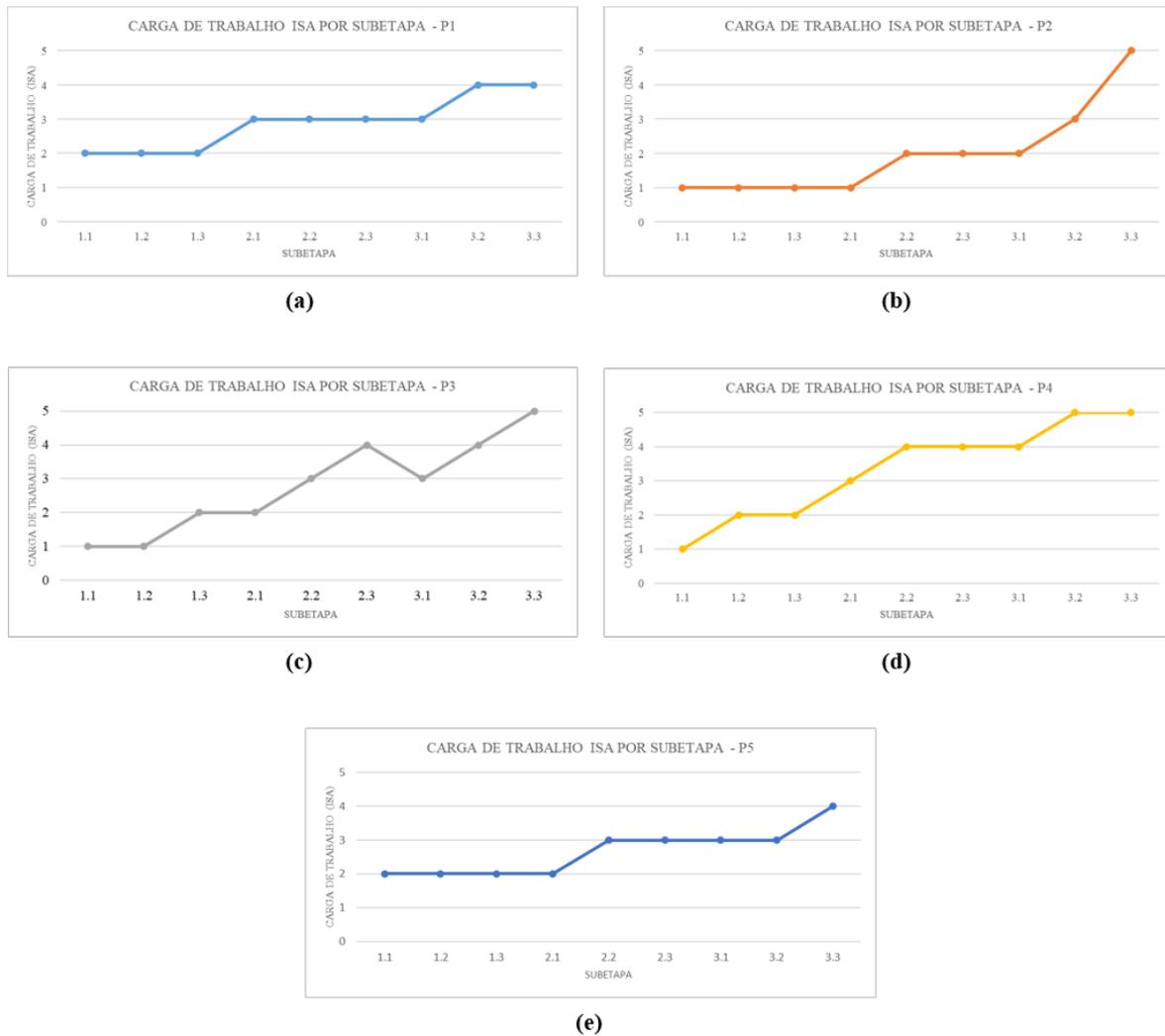
Por meio do método de Autoavaliação Instantânea (ISA) foi possível obter dados de carga de trabalho mental em cada subetapa do teste para cada participante, permitindo a construção de um perfil de carga de trabalho ao longo do experimento. Cada um dos cinco participantes avaliou a carga de trabalho mental pela escala ISA após cada um dos três voos realizados em cada uma das três etapas. Sendo assim, foram adquiridos nove medidas de carga de trabalho por participante e quarenta e cinco no total, conforme apresentado nessa seção.

Um fator importante para a análise dos dados obtidos através da técnica ISA é que, além da possibilidade de análise comparativa entre as cargas de trabalho percebidas nas diferentes tarefas do ensaio, esse método também permite inferir, em alto nível, a percepção da carga de trabalho pelo participante em relação aos seus recursos totais disponíveis. Isso acontece porque a escala de classificação conta com descrições para cada um dos níveis de severidade que direcionam a avaliação para a capacidade de realização de outras tarefas (*i.e.*, recursos mentais ou físicos) ainda disponível durante a realização daquela tarefa. Sendo assim, a seguir estão apresentados e discutidos, com base na descrição dos níveis de classificação da escala, os valores obtidos de cada participantes individualmente. Em seguida esses dados são apresentados e discutidos de forma conjunta.

A Figura 18a mostra os valores de carga de trabalho percebida pelo participante número 1 (P1) em cada uma das subetapas. Pelo gráfico é possível perceber claramente o aumento da carga de trabalho entre as etapas. Nos três primeiros voos que compõe a primeira etapa, isto é, a etapa em que o piloto foi responsável por supervisionar apenas uma RPA, o participante assinalou o valor 2 na escala, indicando uma ampla capacidade ainda disponível para a realização de outras tarefas. Nos voos correspondentes à segunda etapa, com adição de uma aeronave sob sua supervisão, o participante assinalou o valor 3 na escala para todos os voos. Apesar do aumento na carga de trabalho percebida, esse valor ainda indica, segundo as descrições da escala ISA, um nível de carga de trabalho confortável, com todas as tarefas sob o controle do piloto, que pode

ficar continuamente neste nível. Por fim, na terceira etapa, com três RPAs sob sua supervisão, o piloto indicou uma carga de trabalho confortável apenas para o voo sem incidentes (*i.e.*, nível 3 na escala ISA). Nas demais subetapas o participante assinalou o nível 4 na escala, o que corresponde a uma carga de trabalho alta, com a possível não realização de tarefas secundárias. Segundo a definição da escala, o participante não seria capaz de trabalhar nesse nível por um tempo prolongado.

Figura 18 – Carga de trabalho mental percebida pelos participantes segundo a escala ISA (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores de carga de trabalho percebida pelo participante número 2 (P2) estão apresentados no gráfico da Figura 18b. Para esse piloto, todos os voos da primeira etapa foram assinalados como nível 1 na escala, ou seja, carga de trabalho subutilizada. O mesmo valor foi assinalado para o voo sem incidentes da segunda etapa. Já para os demais voos da segunda etapa e para o voo sem incidentes da terceira etapa o participante indicou o nível 2, ou seja, um estado relaxado de carga de trabalho.

Já o participante número 3 (P3), como pode ser observado no gráfico da Figura 18c, assinalou o nível 1 para os dois primeiros voos e o nível dois para o o último voo da primeira etapa e o primeiro voo da segunda etapa, indicando a baixa demanda percebida. As duas subetapas seguintes, ambas na segunda etapa, mostraram um aumento gradual na carga de trabalho percebida pelo participante, que assinalou 3 na escala ISA para o voo com a falha do sistema e 4 para o voo com a aeronave invasora, indicando, respectivamente, cargas de trabalho confortável e alta. No primeiro voo da terceira etapa a carga de trabalho percebida voltou para o nível confortável (*i.e.*, 3 na escala ISA). Contudo, nos dois últimos voos com três aeronaves sob supervisão, o piloto número 3 indicou novamente um aumento gradual na carga de trabalho percebida, passando do nível 4 (*i.e.*, alta carga de trabalho) no voo com incidente para a sobrecarga (*i.e.*, nível 5) na tarefa da aeronave invasora. O último nível da escala ISA, segundo a descrição que acompanha escala, aponta que o participante não se sentia no controle da situação.

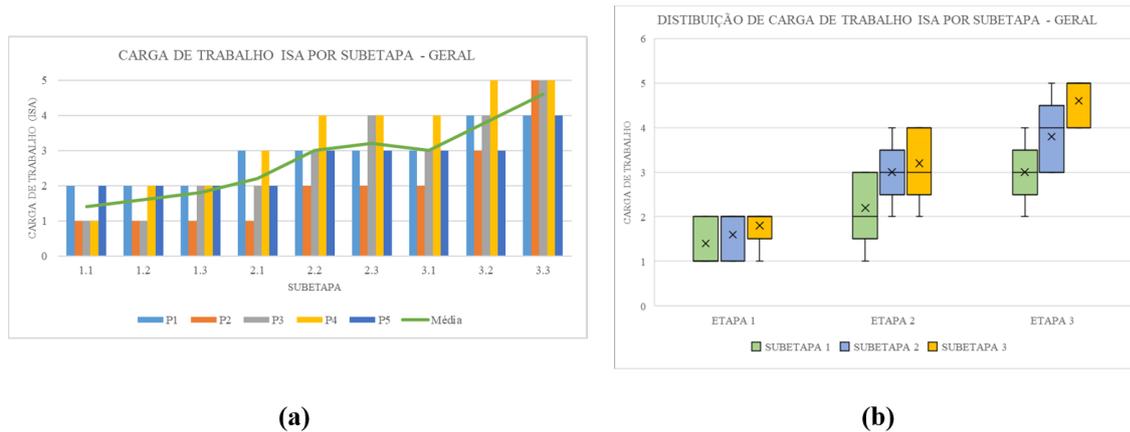
No gráfico da Figura 18d estão os valores de carga de trabalho percebida pelo participante número 4 (P4). Segundo esse piloto, o primeiro voo da primeira etapa demandou o mínimo de carga de trabalho da escala (*i.e.*, nível 1) e os dois voos subsequentes, ainda na primeira etapa, demandaram um carga de trabalho relaxada (*i.e.*, nível 2). A partir da segunda etapa, o participante reportou um aumento significativo na carga de trabalho percebida. Nas subetapas remanescentes, apenas no primeiro voo da etapa com duas aeronaves, isto é, o voo sem incidentes, foi reportado uma carga de trabalho confortável (*i.e.*, nível 3). Nos dois voos com incidentes da segunda etapa e no voo sem incidentes da terceira etapa o participante assinalou o nível 4 da escala ISA, indicando uma carga de trabalho alta. Nas duas últimas subetapas, por sua vez, foi reportada uma carga de trabalho excessiva, ou seja, o nível 5 da escala ISA.

Finalmente, o participante número 5 (P5), conforme exposto na Figura 18e, reportou uma carga de trabalho relaxada, com tempo mais do que suficiente para realizar todas as tarefas (*i.e.*, nível 2), para todos os voos da primeira etapa e para o voo sem incidentes com duas RPAs sob sua supervisão. Para as demais subetapas da segunda etapa e para os dois primeiros voos da etapa com três aeronaves, isto é, respectivamente, os voos com incidente envolvendo a supervisão de duas aeronaves e o voo sem incidente e o voo com falha simples da etapa com três aeronaves supervisionadas, o piloto reportou uma carga de trabalho confortável, com um ritmo ocupado, mas estimulante (*i.e.*, nível 3 na escala ISA). Apendas para o voo com a aeronave invasora na última etapa o participante reportou uma carga de trabalho alta (*i.e.*, nível 4)

Analisando agora os dados de todo o grupo em conjunto, os gráficos das Figuras 19a e 19b apresentam os valores de carga de trabalho na escala ISA reportados por todos os participantes para cada subetapa. A Figura 19a mostra que, no total, o nível de carga de trabalho excessiva (*i.e.*, nível 5 na escala ISA), no qual o indivíduo percebe uma perda de controle da situação, foi reportado quatro vezes, todas na etapa com três aeronaves – em três casos no voo com a aeronave invasora e em um caso no voo com a falha simples. É possível perceber também que, na etapa em que o piloto supervisionou apenas uma aeronave, conforme são a maioria das operações

atualmente e as condições que os participantes tem maior familiaridade, a carga de trabalho percebida não passou do nível 2, isto é, relaxada, conforme a descrição da escala. Já nos voos da etapa 2 (*i.e.*, duas RPAs sob a supervisão do piloto), a carga de trabalho máxima reportada foi “alta”, equivalente ao nível 4 da escala ISA, sendo percebida por dois pilotos diferentes no voo com aeronave invasora e por um piloto no voo da falha simples.

Figura 19 – Carga de trabalho na escala ISA de todos os participantes (a) valores individuais reportados e a média; (b) distribuição dos valores reportados.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 19b apresenta a distribuição por subetapa dos valores de carga de trabalho reportados pelos participantes agrupados por etapa em um gráfico do tipo diagrama de caixa<sup>a</sup>. Nesse gráfico, fica evidente que as maiores cargas de trabalho reportadas em cada etapa foram para os voos com a aeronave invasora – *i.e.*, terceiro voo de cada etapa. Além disso, as maiores dispersões de carga de trabalho percebida foram registradas no primeiro e terceiro voo da segunda etapa (com duas RPAs) e no segundo voo da última etapa (com três RPAs). Nesses casos, os valores do primeiro voo da segunda etapa variaram entre cargas de trabalho baixas e confortáveis; o último voo da segunda etapa variou em torno do nível “confortável”, para cima e para baixo; e, por fim, o segundo voo da terceira etapa variou entre os níveis “confortável” e os níveis superiores. As menores dispersões foram encontradas nos três voos da primeira etapa e no último voo da última etapa – os primeiros com baixa carga de trabalho e o último com carga de trabalho excessiva.

Considerando as médias das cargas de trabalho percebidas em cada voo, ainda pelo gráfico da Figura 19b, percebe-se que os voos da primeira etapa e o voo inicial da segunda etapa ficam próximos de uma baixa carga de trabalho percebida. Já os demais voos da segunda etapa e o primeiro voo da terceira etapa estão no nível de uma carga de trabalho confortável. Por outro lado, o voo com falha simples (*i.e.*, segunda subetapa) da terceira etapa está mais próximo de

<sup>a</sup> Nesses gráficos, 50% dos valores são representados dentro das “caixas”, a média por um “x” e os extremos representados por *whiskers* saindo das caixas, quando aplicável.

uma carga de trabalho percebida como alta (*i.e.* nível 4), enquanto o voo com a aeronave invasora da última etapa indica uma carga de trabalho excessiva (*i.e.*, nível 5) em termos de média dos dados. A Tabela 6 a seguir exibe os resultados registrados de todos os participantes, assim com as médias e desvios padrão de cada subetapa.

Tabela 6 – Resultados compilados ISA por subetapa.

Subetapa	Média ISA	Desvio padrão	P1	P2	P3	P4	P5
1.1	1,4	0,55	2	1	1	1	2
1.2	1,6	0,55	2	1	1	2	2
1.3	1,8	0,45	2	1	2	2	2
2.1	2,2	0,84	3	1	2	3	2
2.2	3,0	0,71	3	2	3	4	3
2.3	3,2	0,84	3	2	4	4	3
3.1	3,0	0,71	3	2	3	4	3
3.2	3,8	0,84	4	3	4	5	3
3.3	4,6	0,55	4	5	5	5	4

Fonte: Elaboração própria.

Considerandos os resultados apresentados até aqui e adotando as seguintes premissas:

- i. as médias encontradas são representativas para análise da carga de trabalho experienciada nesse tipo de operação;
- ii. o nível ISA 3, isto é, uma carga de trabalho confortável, é o nível máximo aceitável para a carga de trabalho de atividades regulares (*i.e.*, aquelas atividades sempre presentes e que ocupam o maior tempo durante a operação);
- iii. o nível ISA 4, isto é, uma carga de trabalho alta, é aceitável apenas para eventos de duração relativamente curta e frequência relativamente baixa; e
- iv. o nível ISA 5, isto é, o nível de sobrecarga, é inaceitável em qualquer momento da operação.

Nesse caso, pelos valores encontrados na Tabela 6, é coerente afirmar que o número máximo de aeronaves supervisionadas por um piloto remoto com certa experiência mínima seria igual dois – *i.e.*, duas RPAs sob supervisão de um piloto. Isso porque o nível médio de carga de trabalho para a etapa com duas aeronaves só ultrapassa o “confortável” para o evento de aeronave invasora, que se espera ser pouco frequente e de duração relativamente curta, ou seja, não pode ser considerado tarefa regular, sendo aceitável pela premissa (iii) uma alta carga de

trabalho – e mesmo pra esse caso, o valor encontrado é mais próximo do nível “confortável” do que do nível “alto”.

Já para a terceira etapa (*i.e.*, três RPAs sob supervisão do piloto), apesar do voo sem incidentes apresentar um nível de carga de trabalho percebido confortável, a média encontrada para o voo com a aeronave invasora ficou muito próxima da sobrecarga, o que não seria aceitável, segundo a premissa (iv). Além disso, apesar de apresentarem uma duração relativamente curta, as ocorrências representadas na segunda etapa são esperadas de acontecer com uma frequência relativamente alta, o que também tornaria inaceitável, seguindo a condição (iii), uma carga de trabalho próxima do nível 4 (*i.e.*, alta carga de trabalho), que foi o encontrado na média.

É fundamental destacar, no entanto, que essas conclusões se baseiam apenas nos dados coletados por esse experimento. Por isso, a premissa (i) deve ser considerada com ressalvas, uma vez que é essencial levar em conta as condições e simplificações adotadas para as tarefas dos pilotos e as próprias limitações do ambiente simulado e das escalas subjetivas. Caso as condições do estudo fossem outras, por exemplo, caso fossem considerados RPAS de pulverização desenvolvidos especialmente operações de múltiplas aeronaves ou pilotos com grande experiência nesse tipo de operações (ambas as condições dificilmente encontrados dado o contexto tecnológico e regulatório atual), o número de RPAs por piloto remoto poderia ser maior.

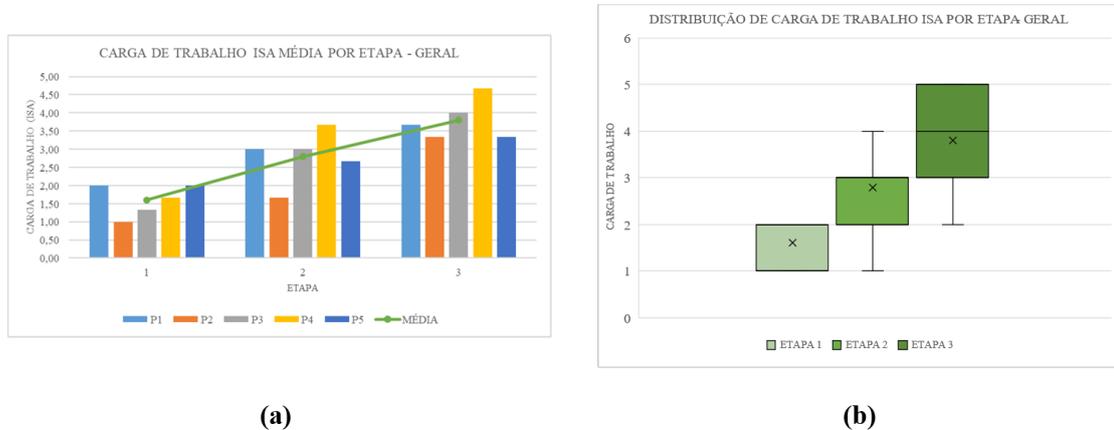
A análise realizada acima serve, contudo, como um bom indicativo, mesmo que em alto nível, de que, de fato, o desempenho humano é um aspecto relevante para a determinação do nível de risco das operações com múltiplas RPAs. Além disso, estudos complementares devem ser realizados e novas soluções operacionais e de projeto que levem em conta as limitações humanas devem ser discutidas antes de se considerar a legalização desse tipo de operação.

Outros resultados relevantes que podem ser extraídos dos dados obtidos são os valores de carga de trabalho média por etapa, conforme apresentado nas Figura 20a e 20b e na Tabela 7. Nesse caso, a maior dispersão dos dados foi encontrada na terceira etapa, muito em função da diferença da carga de trabalho percebida entre os voos sem incidentes e o voo com a aeronave invasora (carga de trabalho mais alta).

Além dos dados brutos apresentados até aqui, que foram analisados com base na interpretação dos participantes dos níveis de carga de trabalho descritos na escala ISA, informações relevantes para o estudo também podem ser encontradas explorando os dados de cada participante transformados para uma escala padrão. Essa padronização reduz os efeitos da subjetividade na interpretação dos significados absolutos dos valores na escala, focando na maior robustez da relatividade das classificações por cada indivíduo. Em outras palavras, a padronização reduz as diferenças dos níveis individuais (relacionados às características próprias de cada indivíduo), destacando as variações provocadas pelo aumento da demanda em cada um dos participantes.<sup>[82][68]</sup>

Para a padronização dos dados foi utilizada a Equação 4.1, onde  $x_1$  é o valor desejado,  $x_0$  é o dado bruto,  $\bar{x}$  é a média do indivíduo,  $s$  é o desvio padrão do indivíduo,  $\sigma$  é o desvio padrão

Figura 20 – Valores de carga de trabalho média por etapa na escala ISA (a) médias individuais por etapa; (b) distribuição das médias individuais por etapa.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 – As médias e desvios padrão por etapa

	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
P1	2,00	0,00	3,00	0,00	3,67	0,58
P2	1,00	0,00	1,67	0,58	3,33	1,53
P3	1,33	0,58	3,00	1,00	4,00	1,00
P4	1,67	0,58	3,67	0,58	4,67	0,58
P5	2,00	0,00	4,67	0,58	3,33	0,58
<b>Grupo</b>	<b>1,60</b>	<b>0,51</b>	<b>2,80</b>	<b>0,86</b>	<b>3,8</b>	<b>0,94</b>

Fonte: Elaboração própria.

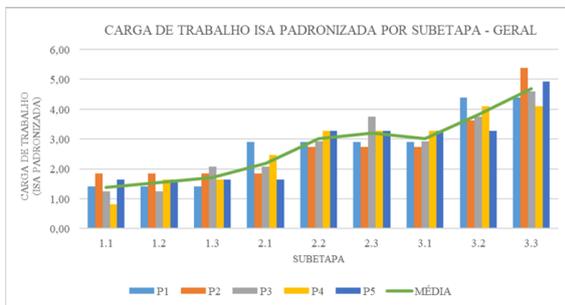
agrupado, e  $\mu$  é a média do grupo. Essa transformação reduz os níveis individuais igualando os valores das médias e desvios padrões de cada indivíduo a média e desvio padrão do grupo. Com isso, além de padronizados em uma escala comum, os dados ainda são mantidos em valores com certo significado para a escala, facilitando a análise dos dados.<sup>[82]</sup>

$$x_1 = \frac{x_0 - \bar{x}}{s} \sigma + \mu \quad (4.1)$$

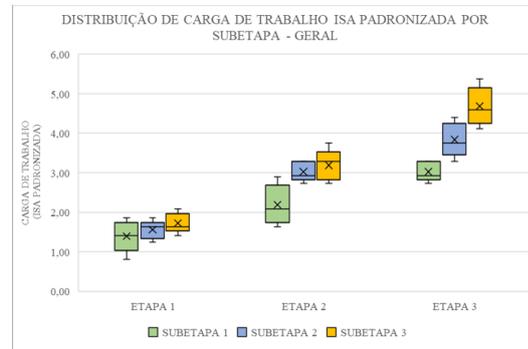
Com os dados transformados é possível analisar com maior robustez a variação na carga de trabalho resultante do aumento do número de RPAs sob supervisão do piloto em cada condição. As Figuras 21a e 21b apresentam os dados padronizados por subetapa. Pelos gráficos, fica claro o aumento da carga de trabalho com o aumento do número de aeronaves sob supervisão do piloto para cada tipo de voo – *i.e.*, voo sem incidentes (subetapa 1); voo com falha simples (subetapa

2); e voo com aeronave invasora (subetapa 3).

Figura 21 – Carga de trabalho na escala ISA padronizada por subetapa (a) por participante; (b) distribuição do grupo.



(a)

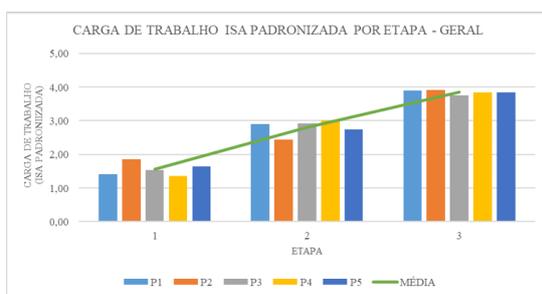


(b)

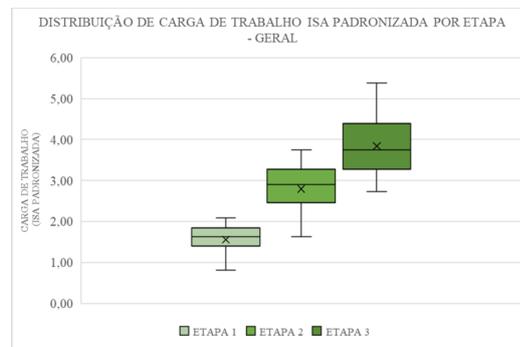
Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 22a e 22b, por sua vez, trazem os dados normalizados por etapa. Esses dados são especialmente relevantes para a comparação com os resultados obtidos com a técnica NASA-TLX, apresentada nas próximas seções.

Figura 22 – Carga de trabalho na escala ISA padronizados por etapa (a) por participante; (b) distribuição do grupo.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

## 4.2 NASA-TLX

O Índice de Carga de Tarefa NASA (NASA-TLX), foi aplicado ao fim de cada etapa, ou seja, após três voos com uma determinada quantidade de aeronaves sob supervisão do participante. Dessa forma, cada um dos cinco pilotos avaliou a magnitude de cada uma das seis dimensões de carga de trabalho percebida três vezes, totalizando quinze valores de carga de trabalho global

calculados. Além disso, cada participante determinou a relevância dos seis fatores que compõe a escala para o cálculo da carga de trabalho global uma vez durante os experimentos.

As Figuras 23a, 23b, 23c, 23d e 23e apresentam os pesos de cada fator dados respectivamente pelos participantes número 1, 2, 3, 4 e 5. Vale lembrar que esses valores correspondem a relevância relativa dada pelo participante a cada uma das seis dimensões de carga de trabalho da escala NASA-TLX (*i.e.*, demanda mental, física e temporal e esforço, frustração e desempenho) para a determinação da carga de trabalho total da tarefa em questão. Essa relevância é posteriormente utilizada como peso para o cálculo da carga de trabalho global, que é feito por meio de uma média ponderada com as magnitudes avaliadas pelo participante para cada escala. Os pesos podem assumir valores inteiros entre 0 e 5 – quanto maior o valor do peso do fator, maior a sensibilidade da dimensão correspondente para o cálculo da carga de trabalho global. Mais informações sobre a metodologia estão descritas na Seção 3.6.2.

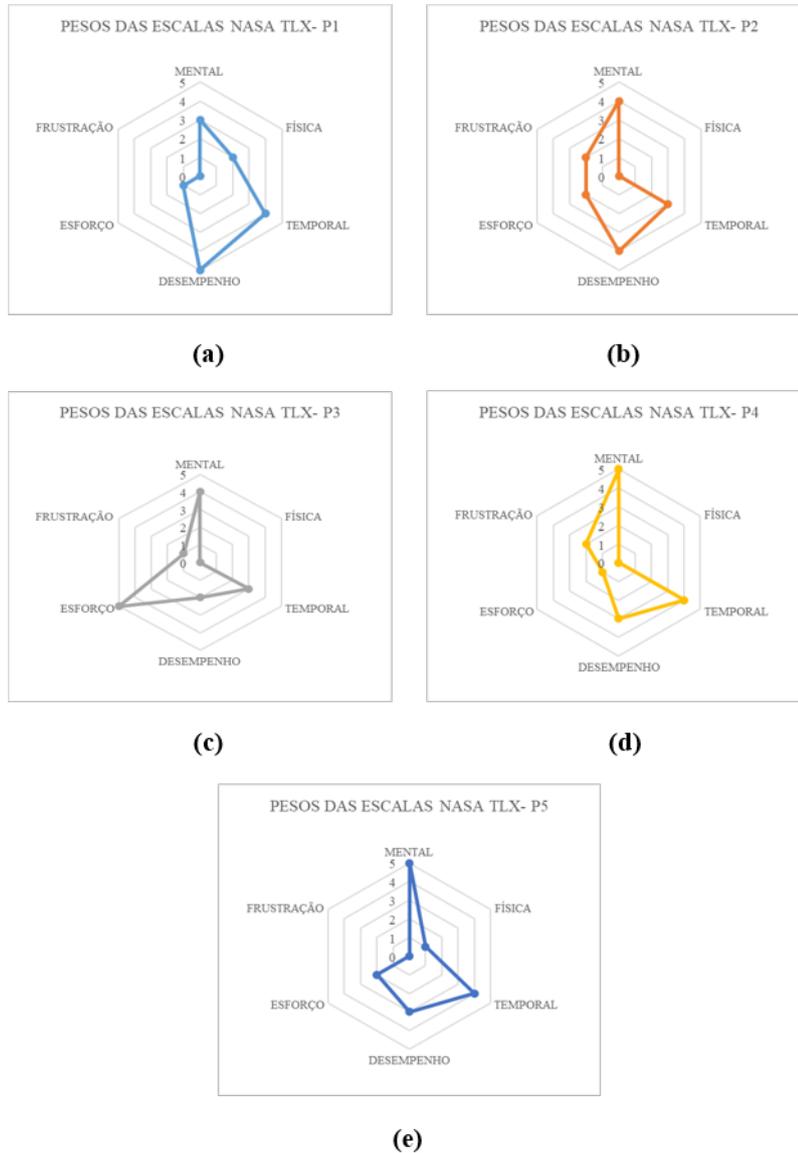
Para o participante número 1 (P1), conforme mostrado na Figura 23a, a dimensão da carga de trabalho que mais contribui para a sua percepção de carga de trabalho foi o “desempenho”, seguido por: “demanda temporal”, “demanda mental”, “demanda física”, “esforço” e, por fim, “frustração”. Isso significa que esse participante considerou que o nível de sucesso obtido foi o fator mais importante para a determinação da carga de trabalho do tipo de tarefa realizado. A Figura 23b mostra que participante número 2 (P2) também considerou “desempenho” como fator mais relevante, porém empatado com “demanda mental”. Em seguida aparece “demanda temporal” e depois mais um empate entre “frustração” e “esforço”. O fator considerado menos relevante por esse participante foi “demanda física”.

Já a Figura 23c mostra que, para o participante número 3 (P3), a dimensão com a maior contribuição foi o “esforço”, seguido por: “demanda mental”, “demanda temporal”, “desempenho”, “frustração” e “demanda física”. Nesse caso, “esforço”, assim como “desempenho” e “frustração” é uma das dimensões relacionadas a interação do sujeito com a tarefa. A maior relevância apontada indica que, para esse participante, o quão duro o ele teve que trabalhar pra atingir o seu desempenho foi o que mais contribui para a carga de trabalho da tarefa.

Por fim, nas Figuras 23d e 23e estão os valores dos pesos referentes aos participantes número 4 (P4) e 5 (P5). Ambos os pilotos consideraram “demanda mental” como o fator mais relevante para a carga de trabalho da tarefa, seguido por “demanda temporal” e “desempenho”. Para o P4, contudo, a ordem de relevância se completa com “frustração”, “esforço” e “demanda física”; enquanto para o P5 essa ordem é “esforço”, “demanda física” e “frustração”.

Analisando as médias do grupo, o fator considerado o maior contribuidor para a carga de trabalho da tarefa em questão foi “demanda mental”, com uma média de 4,2 e desvio padrão ( $s$ ) igual a 0,84. Em seguida aparecem “demanda temporal”, com uma média de 3,6 ( $s = 0,55$ ), “desempenho”, com 3,4 ( $s = 1,14$ ), “esforço”, com 2,2 ( $s = 1,64$ ), “frustração”, com 1,00 ( $s = 1,00$ ) e, por fim, “demanda física”, com um valor médio de 0,6 ( $s = 0,89$ ).

Figura 23 – Pesos das dimensões da escala NASA-TLX por participantes (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.



Fonte: Elaboração própria.

Como exposto na Seção 3.6.2, as seis dimensões de carga de trabalho da escala NASA-TLX podem ser divididas em dois grupos. Em primeiro lugar, como já mencionado acima, estão as dimensões relacionadas à interação do sujeito com a tarefa: “esforço”, “frustração” e “desempenho”. O outro grupo é formado pelos fatores que representam o tipo de demanda que a tarefa exige do executor, isto é, as dimensões que caracterizam as demandas impostas ao indivíduo, sendo essas: “demanda mental”, “demanda temporal” e “demanda física”. Nesse estudo, o maior interesse está na caracterização do tipo de demanda exigido nas tarefas que envolvem a pilotagem de RPAs de pulverização, isto é, no segundo grupo.

Para todos os participantes, o fator “demanda física” foi o que menos contribuiu para a

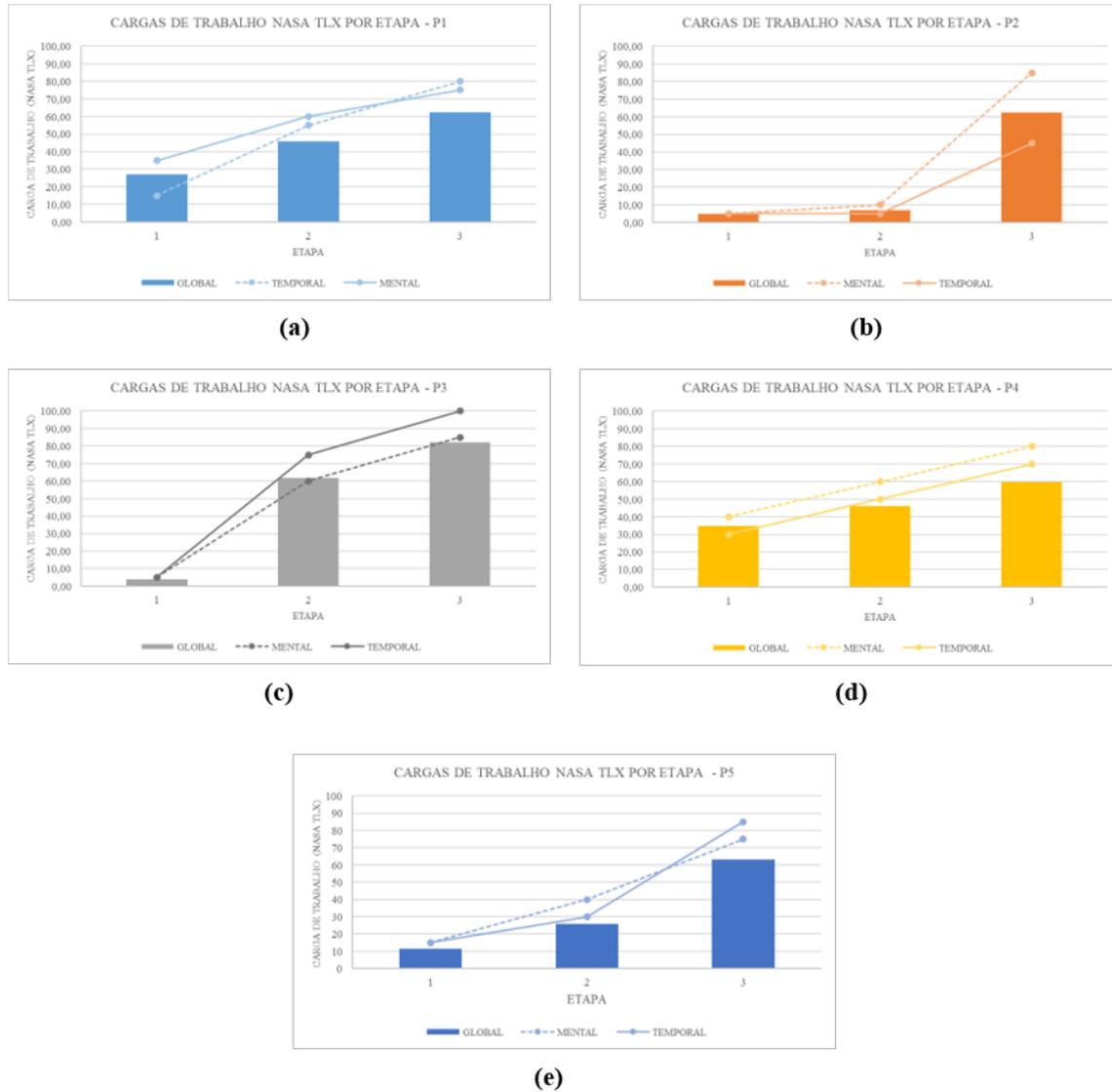
composição carga de trabalho dentre as dimensões do grupo de interesse – além de ter apresentado a menor média geral entre todos os fatores. Esse resultado já era esperado, dada a natureza das demandas envolvidas – *i.e.*, pouco esforço físico requerido. Por outro lado, tanto do ponto de vista do grupo de interesse quanto considerando todos os fatores, “demanda mental” e “demanda temporal” representaram as maiores médias, expondo a importância percebida dessas dimensões para composição da carga de trabalho global da tarefa em análise. Dessa forma, nos resultados individuais apresentados na sequência serão abordados tanto a carga de trabalho global calculada (com os pesos), quanto a avaliação de magnitude feita por cada participante para os fatores “demanda temporal” e “demanda mental” para que estes possam ser também discutidos.

A Figura 24a apresenta os valores referentes ao participante número um (P1). Para esse participante, como pode ser observado no gráfico, a carga de trabalho global calculada foi crescente entre as etapas, passando de 27,00 na etapa com uma única RPA sob a supervisão do piloto, para 45,67 na segunda etapa e 62,33 na etapa final. No que diz respeito aos valores de carga de trabalho percebida reportados pelo P1 nas dimensões de interesse, ainda segundo a Figura 24a, houve uma progressão de 35, 60 e 75 para “demanda mental” e 15, 55 e 80 para “demanda temporal” nas etapas 1, 2 e 3, respectivamente. Apesar da dificuldade de interpretação dos dados de carga de trabalho do indivíduo em termos “absolutos” através dessa escala (*i.e.*, se o valor reportado indica uma sobrecarga ou se a carga indicada representa uma carga de trabalho confortável), devido a falta de parâmetros para comparação, principalmente para cargas de trabalho baixas e intermediárias, é plausível assumir, pelos valores indicados e considerando a etapa 1 como condição normal de trabalho (operações atuais), que a carga de trabalho percebida pelo piloto nas duas dimensões de interesse na etapa com três aeronaves foi alta – ambos os valores estão no “quarto final” da escala, ou seja, o participante reportou um valor maior que 75.

Para o piloto número dois (P2), conforme exposto no gráfico da Figura 24b, os valores calculados para carga de trabalho percebida foram 5,00 e 7,00, para a primeira e segunda etapa, respectivamente, e 62,33 para a etapa com três RPAs sob supervisão do piloto. Além disso, para o fator “demanda mental” os valores reportados foram 5, 10 e 85, em ordem crescente das etapas e, para “demanda temporal”, 5, 5 e 45, na mesma ordem. No caso desse participante, é notável o aumento da carga de trabalho percebida na terceira etapa em comparação com as duas anteriores, indicando o “desconforto” (em termos de carga de trabalho) percebido pelo piloto durante essa etapa em relação as duas anteriores.

O piloto número três (P3), por sua vez, teve uma carga de trabalho global calculada de 4,00 para a etapa inicial, 61,67 para a etapa intermediária e 82,00 para a etapa com o maior número de aeronaves sob sua supervisão. Para os fatores “demanda mental” e “demanda temporal” o participante o valor 5 na etapa inicial em ambos os casos; 60 e 75, respectivamente, na segunda etapa; e 85 e 100, na mesma ordem, na etapa final (*vide* Figura 24c). No caso desse participante, destaca-se a discrepância entre os valores das duas últimas etapas (relativamente altos) em comparação com os valores da primeira etapa, consideravelmente inferiores. Além disso, para

Figura 24 – Carga de trabalho global, mental e temporal percebidas pelos participantes por etapa segundo a escala NASA-TLX (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.



Fonte: Elaboração própria.

a dimensão “demanda temporal”, foi reportada a carga de trabalho máxima na última etapa, indicando que, de fato, esse participante considerou que houve restrições severas de tempo disponível para a realização de todas as tarefas necessárias.

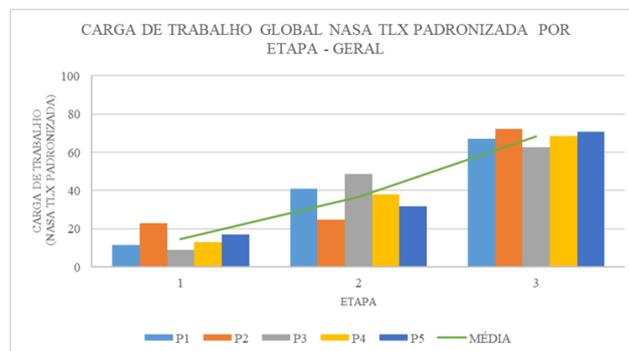
No gráfico da Figura 24d estão apresentados os resultados referentes ao participante número quatro (P4). Os valores de carga de trabalho global calculados para esse piloto foram 34,67, na primeira etapa; 46,00, na segunda etapa; e 59,67 na terceira etapa. No que diz respeito à dimensão “demanda mental”, esse piloto reportou uma carga de trabalho na escala NASA-TLX igual a 40, na etapa inicial; 60, na etapa com duas RPAS; e 80 para a etapa derradeira. Já para o fator “demanda temporal” esses valores foram: 30, 50 e 70, respectivamente para as etapas 1, 2 e 3. Percebe-se que, para esse piloto, houve um aumento quase linear das cargas de trabalho entre

as etapas. Além disso, esse foi o participante que apresentou a menor diferença entre as cargas de trabalho da primeira e da terceira etapa.

Por fim, na Figura 24e estão os valores relativos ao participante número cinco (P5). No caso desse piloto, as cargas de trabalho globais percebidas calculadas foram 11,33; 25,67; e 63,00, para as etapas 1, 2 e 3, respectivamente. Considerando essa mesma ordem de etapas, o participante reportou, para a dimensão “demanda mental” os valores 15, 40 e 75; e, para “demanda temporal” 15, 30 e 85.

Para a análise dos dados do grupo em conjunto, foi realizada a mesma padronização feita para os dados da escala ISA (consultar Seção 4.1). A Figura 25 mostra os valores de carga de trabalho global padronizados de cada participante em cada etapa, além da média, por etapa, de todos os pilotos. Nesse gráfico, assim com em outros casos já apresentados até aqui, é nítido o aumento considerável de carga de trabalho percebida entre as etapas. Outro ponto importante a se destacar nos dados médios padronizados é o maior aumento na carga de trabalho percebida entre a segunda e a terceira etapa do que entre a primeira e a segunda – a diferença entre a primeira e a segunda etapa foi de 22,20 pontos na escala NASA-TLX padronizada enquanto entre a segunda e a terceira foi de 31,39. Esse aumento na carga de trabalho pode ser um indício de uma não linearidade na relação entre carga de trabalho e número de aeronaves sob supervisão do piloto.

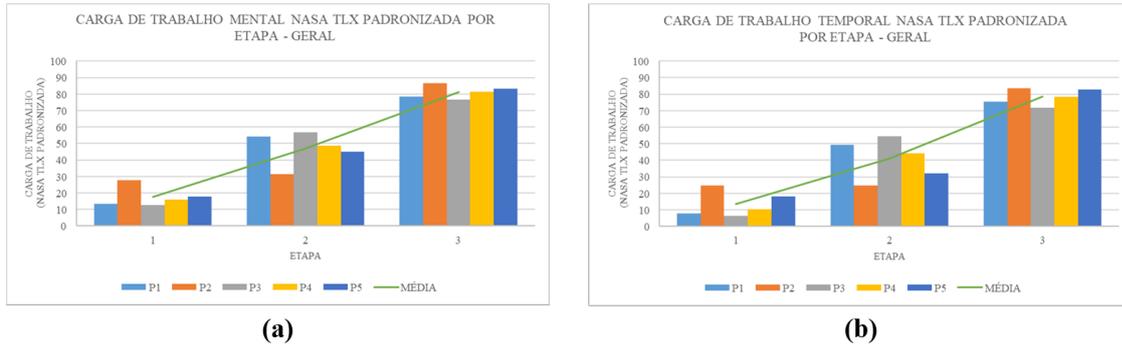
Figura 25 – Carga de trabalho global NASA-TLX padronizada por etapa



Fonte: Elaboração própria.

A análise dos gráficos dos dados padronizados em conjunto referentes às dimensões de interesse, conforme apresentado nas Figuras 26a (“demanda mental”) e 26b (“demanda temporal”), também deixa nítido o aumento da carga de trabalho percebida entre as etapas. Além disso, assim como no caso da carga de trabalho global, para ambos os fatores houve um maior aumento no acréscimo da terceira RPA do que na adição da segunda – para “demanda mental” as diferenças foram 29,72 entre a primeira e a segunda etapa e 34,10 entre a segunda e a terceira; e, para “demanda temporal”, esses valores foram, respectivamente, 27,56 e 37,40. Por fim, outro ponto que vale o destaque dos gráficos em questão é a grande discrepância entre os valores reportados por todos os pilotos na primeira etapa (operação normal) e os valores da última etapa (com três aeronaves).

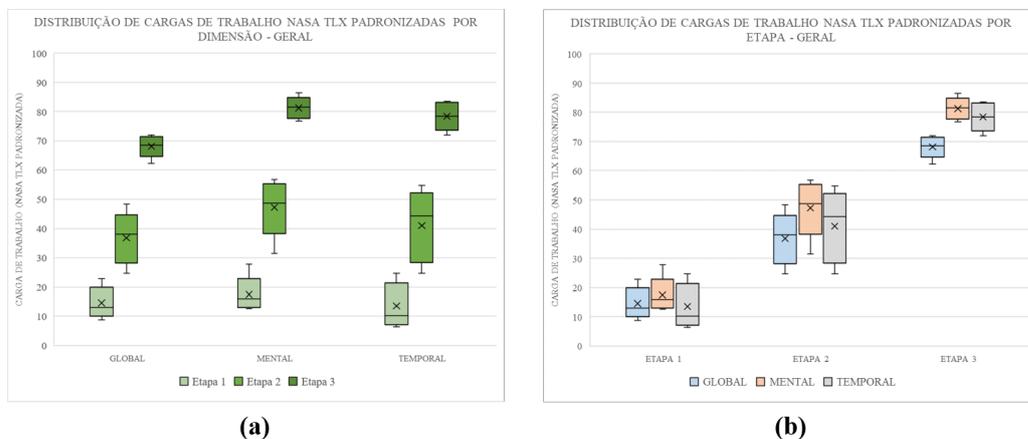
Figura 26 – Cargas de trabalho Mental e Temporal NASA-TLX padronizadas por etapa



Fonte: Elaboração própria.

Ainda considerando os dados padronizados de todos os participantes em conjunto, os gráficos das Figuras 27a e 27b auxiliam na comparação e análise da variabilidade dos valores de cargas de trabalho dos dois fatores de interesse e da carga global nas três etapas do experimento. Nota-se, nessas imagens, que as menores variabilidades, em todos os casos (*i.e.*, “demanda mental”, “demanda temporal” e carga global), são encontradas na terceira etapa, com todos os pilotos indicando valores relativamente altos de carga de trabalho. Por outro lado, as maiores variabilidades aparecem na segunda etapa, o que pode indicar uma carga de trabalho absoluta intermediária – geralmente, cargas de trabalho intermediárias, em técnicas de medição subjetivas, tendem a apresentar maior variabilidade.<sup>[63]</sup> Outro ponto relevante, observado principalmente na Figura 27b, é a similaridade de comportamento entre a distribuição dos valores de carga de trabalho das duas dimensões de interesse e da carga global calculada entre as etapas, isto é, tanto em termos de médias quanto de variabilidade, os dados de carga de trabalho dos três parâmetros analisados são muito próximos em cada uma das etapas.

Figura 27 – Distribuição de carga de trabalho padronizada NASA-TLX do grupo (a) por tipo de fator; (b) por etapa.

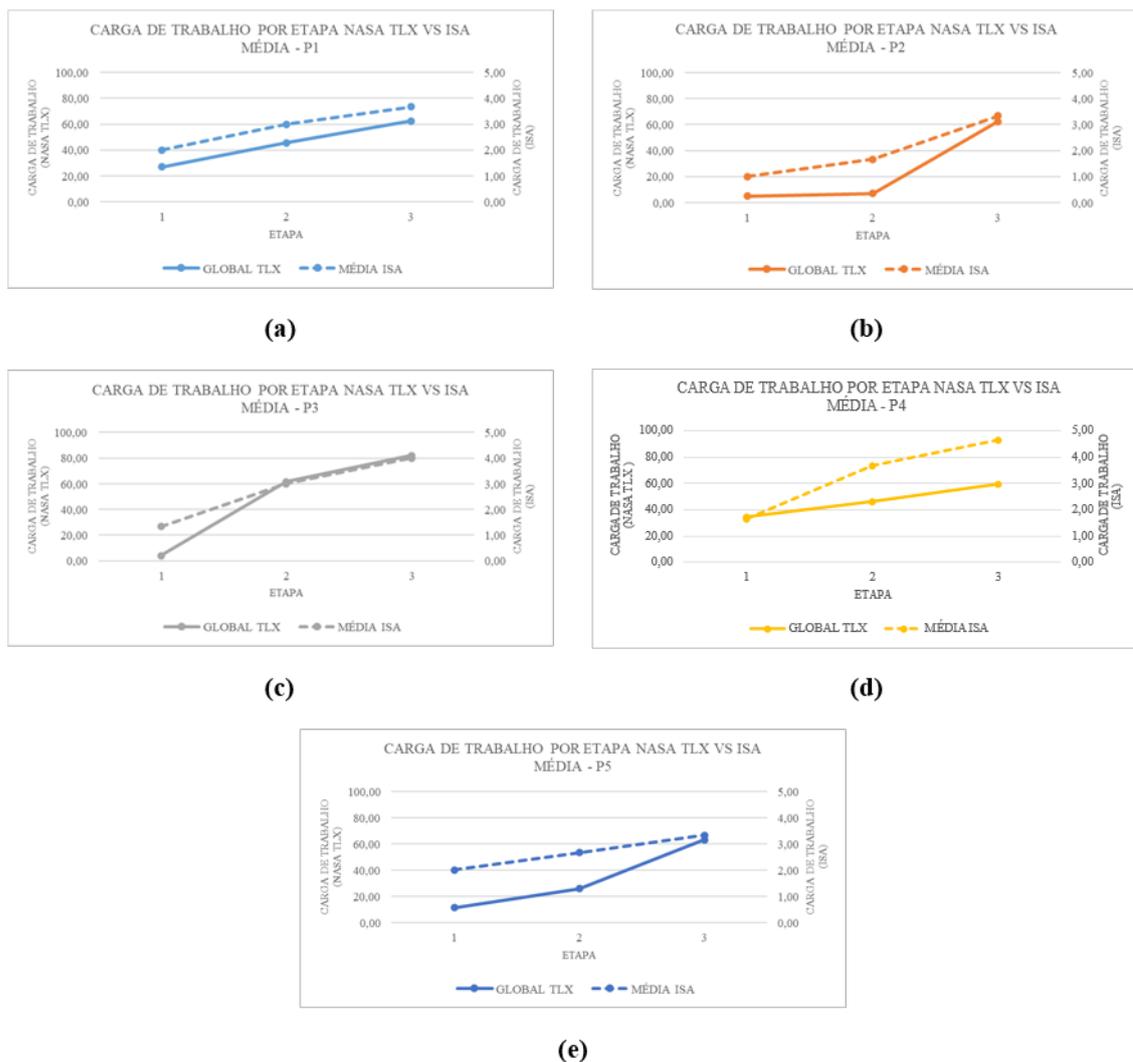


Fonte: Elaboração própria.

### 4.3 ISA versus NASA TLX

O objetivo dessa seção é comparar os valores de carga de trabalho percebida entre as duas técnicas subjetivas de avaliação de carga de trabalho consideradas nesse estudo – *i.e.*, ISA e NASA-TLX. Para isso, as Figuras 28a, 28b, 28c, 28d e 28e apresentam, para cada um dos 5 participantes, gráficos comparando os valores de carga de trabalho global calculada pela metodologia NASA-TLX e os valores médios de carga de trabalho percebida conforme a escala ISA. De modo geral, percebe-se que os valores médios da escala ISA são relativamente superiores, contudo, pode-se assumir que isso se deve, principalmente, a menor amplitude da escala. Apesar disso, observa-se uma grande similaridade nos comportamentos dos valores das cargas de trabalho entre as etapas das duas técnicas para cada participante. Essa similaridade entre os dados de duas metodologias distintas é importante para a garantia da robustez da análise.

Figura 28 – Carga de trabalho global NASA-TLX versus Média ISA por etapa de cada participante (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4; (e) P5.

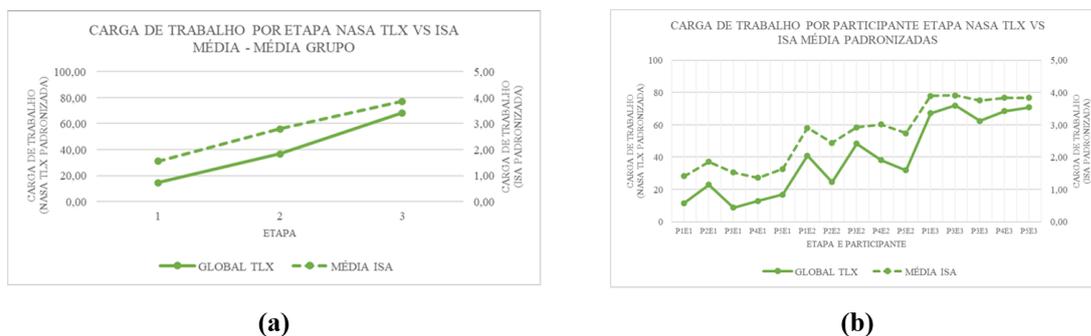


Fonte: Elaboração própria.

As poucas discrepâncias encontradas estão principalmente nas maiores ou menores variações de valores entre as etapas a para cada técnica. Para o P3 (Figura 28c), por exemplo, houve um maior aumento na carga de trabalho percebida entre a primeira e segunda etapa para a escala NASA-TLX do que para escala ISA. O oposto ocorre para o P4 (Figura 28d). Essas variações, contudo, estão associadas as diferenças nas interpretações dos valores das escalas e nas próprias dificuldades intrínsecas de se mensurar níveis de carga de trabalho intermediários e baixos. Essas variações estão dentro do esperado desse tipo de avaliação e não impactam a análise dos dados como um todo.

A similaridade entre os valores encontradas para diferentes escalas é corroborada pela análise dos dados do grupo em conjunto. O gráfico da Figura 29a mostra os valores médios do grupo por etapa para as duas escalas. Nesse caso, o coeficiente de correlação de Pearson calculado foi de 0,989, evidenciando uma correlação muito forte entre os dados.<sup>[87]</sup> Já o gráfico da Figura 29b apresenta todos os valores de cada participante por etapa – no caso da ISA são os valores médios. O coeficiente de correlação de Pearson para esse caso foi de 0,977, também confirmando a forte correlação entre os dados.

Figura 29 – Carga de trabalho NASA-TLX vs. Média ISA por etapa (a) média do grupo (b) por participante.



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.4 EDA

A atividade eletrodérmica, medida através de um sinal de resposta de condutância da pele, é uma grandeza muito dependente tanto de fatores externos (*e.g.*, temperatura do ambiente) quanto das características individuais e das condições de realização do experimento de cada participante (*e.g.*, produção natural de suor e estado emocional). Devido a essas influências, os valores mensurados para cada participantes apresentaram intervalos significativamente distintos. Especificamente para o caso do participante número 3, os valores ficaram muito próximos do limite inferior da faixa de medição do equipamento, impossibilitando a análise dos dados. A seguir, portanto, estão apresentados e discutidos os resultados da atividade eletrodérmica dos participantes número 1, 2, 4 e 5 mensurados durante o experimento.

Conforme exposto na Seção 3.5.2, o sinal de resposta de condutância da pele é formado por duas componentes, uma tônica e uma fásica. Para extrair os efeitos da variação de carga de trabalho mental demandada nas diferentes condições do experimento, as médias dos valores dessas das componentes em cada uma das condições foram calculadas e comparadas. A Figura 30 apresenta as médias dos valores das componentes tônica e fásica de cada participante em cada subetapa do experimento.

Figura 30 – Médias das componentes tônica e fásica da atividade eletrodérmica de cada participante por subetapa (a1) Tônica P1; (a2) Fásica P1; (b1) Tônica P2; (b2) Fásica P2; (c1) Tônica P4; (c2) Fásica P4 (d1) Tônica P5; (d2) Fásica P5.

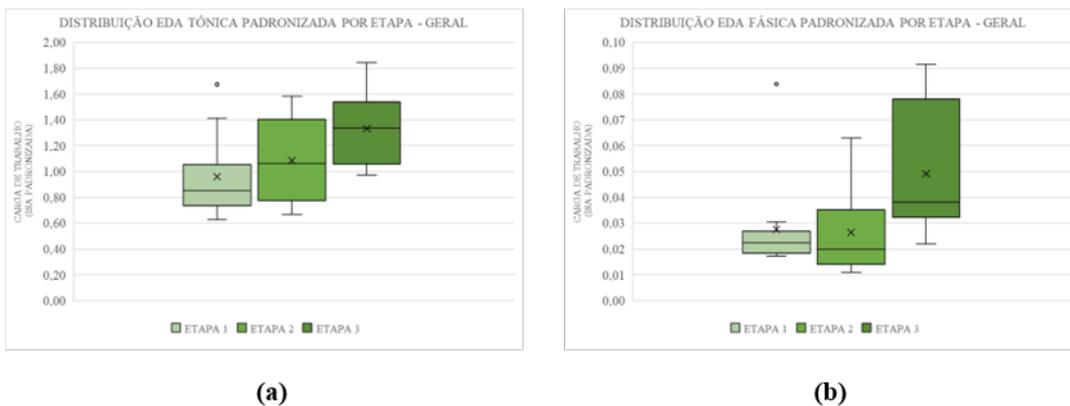


Fonte: Elaboração própria.

Analisando os dados da Figura 30, nota-se a existência de alguns valores não esperados – *e.g.* a subetapa 1 da primeira etapa no gráfico referente ao participante P4, isso é, os dados relativos ao voo sem incidentes e com apenas uma aeronave sob supervisão do piloto (condição normal das operações atuais), apresentou o maior valor médio de todas as subetapas tanto para a componente tônica quanto para a componente fásica. Diversas podem ser as razões para essas ocorrências, uma vez que, conforme já explicado, a atividade eletrodérmica é bastante influenciada por fatores externos ao experimento.

Contudo, conforme apresentado na Figura 31 ao analisar a distribuição dos valores mensurados padronizados (*vide* Equação 4.1 na Seção 4.1), percebe-se o aumento dos valores mensurados de ambas as componentes com o aumento do número de aeronaves sob supervisão do piloto – *i.e.*, valores crescentes entre as etapas 1, 2 e 3 respectivamente. Esse resultado indica o aumento da carga de trabalho mental demanda com o aumento do número de RPAs, corroborando com os resultados das escalas subjetivas.

Figura 31 – Distribuição dos valores padronizados das componentes tônica e fásica.



Fonte: Elaboração própria.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo inicialmente proposto neste trabalho, em uma perspectiva mais ampla, era reunir informações que pudessem contribuir para uma maior compreensão do impacto do desempenho humano nas operações de pulverização agrícola envolvendo a pilotagem de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas por um único piloto remoto. Para tanto, durante o estudo, foram realizadas testes e análises para a determinação dos níveis de carga de trabalho mental demandados dos pilotos durante esse tipo de operação com diferentes números de aeronaves sob sua supervisão.

Os resultados obtidos a partir desse estudo revelaram aspectos importantes quanto ao efeito do aumento do número de aeronaves sob supervisão do piloto em sua carga de trabalho mental. Sumariamente, os dados encontrados apontam que, para as condições propostas, embora seja possível um piloto supervisionar mais de uma RPA simultaneamente, a carga de trabalho aumenta consideravelmente com cada adição de aeronave não tripulada.

Os experimentos foram conduzidos com os pilotos supervisionando uma, duas e três aeronaves. Os resultados revelaram valores de carga de trabalho consideravelmente altos para a etapa com três aeronaves, especialmente quando o participante teve que lidar com a presença de uma aeronave invasora. Outro ponto de destaque foi indicação, pelos valores encontrados, de que a adição da terceira RPA resulta em um aumento de carga de trabalho maior do que a adição da segunda, sugerindo que esse aumento é mais acentuado quanto maior o número total de RPAs envolvidas. Contudo, estudos com uma faixa maior de aeronaves devem ser realizados para confirmar essa indicação.

O aumento significativo na carga de trabalho percebida pelos pilotos com a adição de aeronaves sob sua supervisão foi evidenciado pelos resultados de ambas as escalas subjetivas utilizadas para a avaliação e corroborado pelos dados objetivos obtidos através do sensor de atividade eletrodérmica. A semelhança dos resultados entre as diferentes escalas e a concordância com os dados objetivos sugerem a eficácia das metodologias para capturar a percepção dos indivíduos na condição proposta e fortalecem a validade das conclusões obtidas.

É importante ressaltar, no entanto, que a abrangência desses resultados deve ser ponderada considerando as limitações dos processos envolvidos, tanto em relação às simplificações utilizadas durante os experimentos em ambiente simulado quanto ao tamanho do grupo considerado. Apesar disso, essas ponderações não inibem a conclusão geral de que o desempenho humano é, sem dúvida, um aspecto fundamental e de alta importância ao discutir o aumento do número de aeronaves remotamente pilotadas sob supervisão de um único piloto remoto. Resultados mais abrangentes exigem novos estudos em condições apropriadas, incluindo, por exemplo, operações reais, mas sempre levando em conta o que já foi aprendido até o momento.

Diante desses achados, torna-se evidente que mais estudos devem ser conduzidos e as operações como são, de forma geral, conduzidas atualmente precisam ser adaptadas antes que a regulamentação se flexibilize para permitir a ocorrência desse tipo de operações de forma rotineira. Nesse sentido, é fundamental considerar recursos de projeto e operacionais que possam contribuir para a redução da carga de trabalho do piloto remoto em operações com múltiplas RPAs. Isso pode envolver a implementação de maiores níveis de automatização e confiabilidade no sistema não tripulado; uma melhor estruturação do espaço aéreo a fim não só de diminuir a probabilidade de ocorrências de eventos de aeronave invasora, mas também mitigar o risco desses eventos caso aconteçam; o desenvolvimento de interfaces homem-máquina mais intuitivas; e o aprimoramento da formação e capacitação dos pilotos, tudo isso voltado especificamente para operações com o conceito operacional proposto.

Destaca-se, ainda, que, apesar do foco dado para as operações de pulverização, os resultados encontrados nesse estudo também podem servir de base para o estudo de outros tipo de aplicações envolvendo a operação, por um único indivíduo, de diversos sistemas com alto nível de automatização.

Em suma, este estudo oferece informações sobre a carga de trabalho dos pilotos remotos durante operações de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas de pulverização, destacando pontos de interesse para a evolução da regulamentação e do desenvolvimento futuro dessa tecnologia. Ao compreender melhor os fatores que afetam a carga de trabalho dos pilotos remotos, podemos trabalhar em direção a operações mais eficientes, seguras e sustentáveis em diversos contextos de aplicação dos RPAS.

## REFERÊNCIAS

- 1 CUSTERS, B. (comp.). **The Future of Drone Use**: Opportunities and threats from ethical and legal perspectives. Information Technology and Law Series IT&LAW 27. [S.l.: s.n.]: T.M.C. Asser Press, 2016.
- 2 VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. Introduction. *In*: VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. (ed.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles (Volume 1)**. [S.l.: s.n.]: Springer Netherlands, 2016. p. 1–93.
- 3 READE, L. Bombs over venice. **History Today**, Jun. 2021. Disponível em: <https://www.historytoday.com/archive/bombs-over-venice>. Acesso em: 16 out. 2021.
- 4 BARNHART, R. K. *et al.* (ed.). **Introduction to Unmanned Aircraft Systems**. [S.l.: s.n.]: CRC Press, 2011.
- 5 KETTERING Bug. David Darling, 2016. Disponível em: [https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering\\_Bug.html](https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering_Bug.html). Acesso em: 08 jan. 2022.
- 6 WERREL, K. P. (ed.). **The Evolution of the Cruise Missile**. [S.l.: s.n.]: Air University Press, 1985.
- 7 GLOBAL Hawk. Northrop Grumman, s.d. Disponível em: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk/>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 8 SHAW, I. G. R. The rise of the predator empire: Tracing the history of u.s. drones. **Understanding Empire**, 2014. Disponível em: <https://understandingempire.wordpress.com/2-0-a-brief-history-of-u-s-drones/>. Acesso em: 16 out. 2021.
- 9 DJI Phantom 4. DJI, s.d. Disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 10 FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Concept of Operations V2.0**. Washington, 2020. Next Generation Air Transportation System (NextGen).
- 11 VOLOCITY: The superior air taxi. s.d. Disponível em: <https://www.volocopter.com/solutions/volocopter/>. Acesso em: 16 out. 2021.
- 12 UNMANNED Aircraft Systems Traffic Management (UTM) – A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization. International Civil Aviation Organization, 2020. Disponível em: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM\%20Framework\%20Edition\%203.pdf>. Acesso em: 20 nov.2021.
- 13 ANAC. **Quantidade de Cadastros - Drones**. Agência Nacional de Aviação Civil, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/quantidade-de-cadastros>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 14 AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **RBAC-E nº 94 Emenda nº 01**: Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Brasília, DF, 2021. 26 p.

- 15 IMPORTÂNCIA do agronegócio Brasileiro. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural SENAR, 2019. Disponível em: <http://senar-ma.org.br/importancia-do-agronegocio-brasileiro/>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- 16 ANAC. Projetos autorizados. **Ministério da Infraestrutura**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/projetos-autorizados>. Acesso em: 17 out. 2021.
- 17 LANDGRAF, L. **Pulverização com drones na agricultura é destaque na Reunião de Pesquisa de Soja**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/83042416/pulverizacao-com-drones-na-agricultura-e-destaque--na-reuniao-de-pesquisa-de-soja>. Acesso em: 05 jan. 2024.
- 18 SALAS, E.; MAURINO, D. **Human Factors in Aviation**. Elsevier Science, 2010. ISBN 9780080923024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ohjZXuvVTc0C>.
- 19 INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Remotely Piloted Aircraft Systems Panel (RPASP) – Seventh Meeting Working Paper**. Montreal, 2017. RPASP/8-WP/12.
- 20 REMOTELY Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR Operations. International Civil Aviation Organization, 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/RPAS\%20CONOPS.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- 21 ORGANIZATION, I. C. A. Introduction to icao model uas regulations and advisory circulars. **ICAO Safety**, s.d.c. Disponível em: <https://www.icao.int/safety/UA/Pages/ICAO-Model-UAS-Regulations.aspx>. Acesso em: 20 out. 2021.
- 22 ATUAÇÃO da ANAC. GOV.BR, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/passageiros/assistencia-as-vitimas-de-acidentes-aereos/atuacao-da-anac>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- 23 COMPETENCIAS DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo, DECEA, s.d. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/?i=quem-somos&p=competencias>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- 24 AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. Resolução nº 710, de 31 de março de 2023. aprova a emenda nº 03 ao rbac-e nº 94. **Diário Oficial da União**, 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2023/resolucao-710>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- 25 USO de drones na agricultura tem regras simplificadas pela ANAC. GOV.BR, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2023/uso-de-drones-na-agricultura-tem-regras-simplificadas-pela-anac>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- 26 AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **RBAC nº 11 Emenda nº 03**: Regras gerais para petição de emissão, alteração, revogação e isenção de cumprimento de regra. Brasília, DF, 2020. 5 p.
- 27 DRONE Infographics & Charts. Metro, 2021. Disponível em: <https://www.metroworldnews.com.br/estilo-vida/2021/12/15/show-de-luzes-com-drones-faz-o-natal-no-parque-ibirapuera/>. Acesso em: 29 nov. 2021.
- 28 DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **ICA 100-40**: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. Rio de Janeiro, RJ, 2020. 57 p.

- 
- 29 UNMANNED Aircraft Systems (UAS)(Cir 328). International Civil Aviation Organization, 2011. Disponível em: [https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular\%20328\\_en.pdf](https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular\%20328_en.pdf). Acesso em: 10 dez.2021.
- 30 Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) (Doc 10019). International Civil Aviation Organization, 2015. Disponível em: <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019>. Acesso em: 10 dez.2021.
- 31 BOUKOBERINE, M. N.; ZHOU, Z.; BENBOUZID, M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. **Applied Energy**, v. 255, p. 113823, 2019.
- 32 CWOJDZINSKI, L.; ADAMSKI, M. Power units and power supply systems in uav. **Aviation**, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2014.
- 33 JOHANSEN, T. A.; FOSSEN, T. I. Guidance, navigation, and control of fixed-wing unmanned aerial vehicles. In: \_\_\_\_\_. **Encyclopedia of Robotics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. p. 1–9. ISBN 978-3-642-41610-1. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1\\_67-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_67-1).
- 34 GOH, G. D. *et al.* Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (uavs): Challenges and potential. **Aerospace Science and Technology**, v. 63, p. 140–151, 2017.
- 35 VASIC, Z.; MAKSIMOVIE, S.; GEORGIVIEVIE, D. Applied integrated design in composite uav development. **Applied Composite Materials**, v. 25, p. 221–236, 2018.
- 36 HONG, Y.; FANG, J.; Y., T. Ground control station development for autonomous uav. In: XIONG, C. *et al.* (ed.). **Intelligent Robotics and Applications (Part Two)**. Wuhan: Springer, 2008. p. 36–44.
- 37 DJI Agras T30. DJI, s.d. Disponível em: <https://www.dji.com/br/t30?site=brandsite&from=nav>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 38 HERMES 900. s.d. Disponível em: <https://elbitsystems.com/product/hermes-900-5/>. Acesso em: 16 out. 2021.
- 39 FEDERAL Aviation Administration accredits the Drone Racing League as first UAS event organizer. sUAS News, 2021. Disponível em: <https://www.suasnews.com/2021/12/federal-aviation-administration-accredits-the-drone-racing-league-as-first-uas-event-organizer/>. Acesso em: 10 dez.2021.
- 40 ARATOR 5C. Xrobots, s.d. Disponível em: <https://xrobots.com.br/arator-5c/>. Acesso em: 25 nov. 2021.
- 41 PEREZ, D. *et al.* A ground control station for a multi-uav surveillance system. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 69, p. 119–130, 2012.
- 42 ARDUPILOT Documentation. ArduPilot, 2020. Disponível em: <https://ardupilot.org/ardupilot/>. Acesso em: 20 dez.2021.
- 43 QGROUNDCONTROL Intuitive and Powerful Ground Control Station for the MAVLink protocol. QGroundControl, s.d. Disponível em: <http://qgroundcontrol.com/>. Acesso em: 20 dez.2021.

- 44 RESULTS of studies of the AM(R)S allocation in the band 960-1 164 MHz and of the AMS(R)S allocation in the band 5030-5091 MHz to support control and non-payload communications links for unmanned aircraft systems. ITU-R, 2011. Disponível em: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2205-2010-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2205-2010-PDF-E.pdf). Acesso em: 30 nov.2021.
- 45 WHITE Paper: Use of Mobile Networks to Support UAS Operations, JAR-DEL-WG5-D.05. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <http://jarus-rpas.org>. Acesso em: 30 nov.2021.
- 46 WHAT is Lift. NASA, s.d. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lift1.html>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 47 AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **RBAC nº 01 Emenda nº 08**: Definições, regras de redação e unidades de medida para uso nos normativos da anac. Brasília, DF, 2021. 26 p.
- 48 CHAPMAN, A. Drone types: Multi-rotor vs fixed-wing vs single rotor vs hybrid vtol. **Drone**, 2016. Disponível em: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>. Acesso em: 19 out. 2021.
- 49 EBEE X: Drone com asas fixas. SenseFly, s.d. Disponível em: <https://www.sensefly.com/pt/drone/abee-x/>. Acesso em: 25 nov. 2021.
- 50 MULTIROTOR Aircraft Dynamics, Simulation and Contro. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/307513305>. Acesso em: 27 nov.2021.
- 51 DRONE Infographics & Charts. Drone Industry Insight, s.d. Disponível em: <https://droneii.com/infographics>. Acesso em: 25 nov. 2021.
- 52 DJI Mavic Air 2. DJI, s.d. Disponível em: <https://www.dji.com/br/mavic-air-2?site=brandsite&from=nav>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 53 PENGUIN C VTOL UAS: Long-Rang VTOL UAS Solution. UAV Factory, s.d. Disponível em: <https://uavfactory.com/en/penguin-c-vtol-uas>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- 54 EASY Access Rules for Unmanned Aircraft Systems(Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945). EASA eRules, 2021. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems>. Acesso em: 25 nov.2021.
- 55 SPECTRA. ARYS Tecnologia Embarcada Ltda., 2021. Disponível em: <https://flyarys.com/spectra/>. Acesso em: 20 dez.2021.
- 56 PART 107 – Small Unmanned Aircraft Systems. Code of Federal Regulations, 2022. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- 57 ASTM INTERNATIONAL. **F3178-16**: Standard practice for operational risk assessment of small unmanned aircraft systems (suas). West Conshohocken, PA, 2017. 12 p.
- 58 CATAÇÃO. AgroAzul, s.d. Disponível em: <https://www.agro-azul.com/catacao-wwlr8e>. Acesso em: 12 abr. 2024.

- 59 DRONES Agrícolas para pulverização, entenda esta Revolução. ITARC, s.d. Disponível em: <https://itarc.org/drones-agricolas-para-pulverizacao-entenda-esta-revolucao/>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- 60 AIRES, R. **Deriva na aplicação de defensivos: saiba como evitá-la**. Agriq, 2020. Disponível em: <https://agriq.com.br/deriva-na-aplicacao-de-defensivos/>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- 61 STRATUS H12. ARYS Tecnologia Embarcada Ltda., 2021. Disponível em: <https://flyarys.com/stratus-h12/>. Acesso em: 20 dez.2021.
- 62 XAG P100 Agricultural Drone Specs. XAG, s.d. Disponível em: <https://www.xa.com/en/p100/p100specs>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- 63 PROCTOR, R. W.; ZANDT, T. V. **Human Factors in Simple and Complex Systems**. 3rd. ed. USA: CRC Press, Inc., 2017.
- 64 RASMUSSEN, J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, SMC-13, n. 3, p. 257–266, 1983.
- 65 STANTON, N.; SALMON, P.; RAFFERTY, L. **Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design**. Ashgate Publishing Limited, 2013. ISBN 9781409457541. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Es7VCQAAQBAJ>.
- 66 LONGO, L. *et al.* Human mental workload: A survey and a novel inclusive definition. **Frontiers in Psychology**, v. 13, 2022. ISSN 1664-1078. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2022.883321>.
- 67 MAJUMDAR, A. *et al.* En-route sector capacity estimation methodologies: An international survey. **Journal of Air Transport Management**, v. 11, n. 6, p. 375–387, 2005.
- 68 MARINESCU, A. C. *et al.* Physiological parameter response to variation of mental workload. **Human Factors**, v. 60, 2017.
- 69 HALL, J.; GUYTON, A. **Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology**. Saunders/Elsevier, 2011. (ClinicalKey 2012). ISBN 9781416045748. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=di5PtQAACAAJ>.
- 70 CHARLES, R.; NIXON, J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. **Applied ergonomics**, v. 74, p. 221–232, 08 2018.
- 71 ENDSLEY, M. Measurement of situation awareness in dynamic systems. **Human Factors**, v. 37, n. 3, p. 65–, 1995.
- 72 HUMAN SYSTEMS WING, 311., 2005. **US Military Unmanned Aerial Vehicle Mishaps: Assessment of the Role of Human Factors Using Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)**. [S.l.: s.n.]: United States Air Force, 2005.
- 73 SESAR INNOVATION DAYS, 4., 2014. **Quantifying Air Traffic Controller Mental Workload**. [S.l.: s.n.]: SESAR, 2014.
- 74 EUROCONTROL Experimental Centre. **Pessimistic Sector Capacity Estimation EEC Note 21/03**. [S.l.], 2003. (Project COCA).

- 75 IPANEMA 203. EMBRAER, s.d. Disponível em: <https://agricultural.embraer.com/br/pt/ipanema-203>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- 76 BOUCSEIN, W. **Electrodermal Activity**. Springer US, 2012. (The Springer series in behavioral psychophysiology and medicine). ISBN 9781461411260. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=6N6rnOEZEEoC>.
- 77 SIONI, R.; CHITTARO, L. Stress detection using physiological sensors. **Computer**, v. 48, n. 10, p. 26–33, 2015.
- 78 OLIVEIRA, J. V. A. e.; CAURIN, G. A. d. P.; POLEGATO, P. H. Aplicação de sensor eda para classificação de crises epilépticas. *In: **Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade de São Paulo - SIICUSP***. [S.l.: s.n.]: EESC/USP, 2021.
- 79 BENEDEK, M. n. K. C. **Ledalab**. s.d. Disponível em: <http://www.ledalab.de/>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- 80 BENEDEK, M.; KAERNBACH, C. A continuous measure of phasic electrodermal activity. **Journal of Neuroscience Methods**, v. 190, n. 1, p. 80–91, 2010. ISSN 0165-0270. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027010002335>.
- 81 TATTERSALL, A. J.; FOORD, P. S. An experimental evaluation of instantaneous self-assessment as a measure of workload. **Ergonomics**, v. 39 5, p. 740–8, 1996. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:25323285>.
- 82 CASTOR, M. *et al.* **GARTEUR Handbook of Mental Workload Measurement**. Group for Aeronautical Research and Technology in Europe, 2003. (GARTEUR technical publications). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Ht8AkAEACAAJ>.
- 83 KIRWAN, B. *et al.* **Human factors in the ATM system design life cycle**. [S.l.: s.n.]: FAA/Eurocontrol ATM R&D Seminar, Paris, France, 16-20 June, 1997.
- 84 HART, S. G.; STAVELAND, L. E. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. *In: HANCOCK, P. A.; MESHKATI, N. (ed.). **Human Mental Workload***. North-Holland, 1988, (Advances in Psychology, v. 52). p. 139–183. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508623869>.
- 85 MOUZÉ-AMADY, M. *et al.* Fuzzy-tlx: Using fuzzy integrals for evaluating human mental workload with nasa-task load index in laboratory and field studies. **Ergonomics**, v. 56, p. 752–763, 05 2013.
- 86 ZHENG, B. *et al.* Workload assessment of surgeons: Correlation between nasa tlx and blinks. **Surgical endoscopy**, v. 26, p. 2746–50, 04 2012.
- 87 SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, p. 1, 02 2018.

## **APÊNDICES**



## APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO



### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Convidamos você a participar voluntariamente da pesquisa intitulada “Estudo preliminar do impacto de fatores humanos na capacidade de pilotagem simultânea de diversas aeronaves remotamente pilotadas em operações de pulverização agrícola”, que visa explorar a carga de trabalho de pilotos sujeitos ao controle de diversas aeronaves remotamente pilotadas simultaneamente.

Todos os testes serão realizados nas dependências da empresa ARYS Tecnologia Embarcada Ltda. de São Carlos - SP.

Sua participação consiste no cumprimento de tarefas relacionadas controle e supervisão de aeronave não tripuladas, de forma simulada, utilizando software específico para essa finalidade. Este teste será realizado diversas vezes, variando-se o número de aeronaves envolvidas. Importante ressaltar que os voos são simulados, não envolvendo equipamentos reais em voo.

Informamos que o procedimento de realização destes testes não apresenta riscos diretos, onde os mesmos serão realizados em uma sala da disponibilizada pela empresa. A repetição dos testes pode levar ao cansaço. Neste caso, os testes previstos podem ser interrompidos a pedido do voluntário a qualquer momento. A bateria de testes prevista para cada voluntário totaliza, além de uma etapa preparatória, 9 procedimentos, com duração total aproximada de 2 horas, portanto fica acordada a livre realização de intervalos durante os testes, na qual pode ser realizada a qualquer momento, sem prejuízo para a coleta de dados.

A participação dos testes não apresenta custo e nem vantagem financeira aos voluntários, podendo gerar indenização em caso de um eventual dano que possa ocorrer em função dos mesmos.

Esta pesquisa não apresenta benefícios diretos aos participantes. Os benefícios desta pesquisa são indiretos, de forma a auxiliar no desenvolvimento deste projeto, contribuindo para o melhor conhecimento da carga de trabalho de pilotos sujeitos a esse tipo de atividade.

A sua participação é voluntária e o fato de não querer participar não vai trazer qualquer penalidade ou mudança na forma em que você é atendido (a). O pesquisador não vai divulgar seu nome. Os resultados da pesquisa estarão à sua disposição quando finalizada. Você não será identificado (a) em nenhuma publicação que possa resultar.

Este termo de consentimento encontra-se impresso em duas vias originais, sendo que uma será arquivada pelo pesquisador responsável e a outra será fornecida a você. Os pesquisadores tratarão a sua identidade com padrões profissionais de sigilo, atendendo a legislação brasileira (Resolução Nº 466/12 do Conselho Nacional de Saúde), utilizando as informações somente para os fins acadêmicos e científicos.

Declaro que concordo em participar da pesquisa e que me foi dada à oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

---

Voluntário (a)

---

Pesquisador Responsável

Pesquisadores responsáveis:

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto (Professor Doutor) – [jhbidi@sc.usp.br](mailto:jhbidi@sc.usp.br)

Matheus Coelho Gonçalves (Auno de mestrado) – [matheus.coelho.goncalves@usp.br](mailto:matheus.coelho.goncalves@usp.br)

Departamento de Engenharia Aeronáutica – SAA

Escola de Engenharia de São Carlos / USP – EESC/USP



## APÊNDICE B – FICHAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO

### B.1 Ficha de monitoramento de voo

#### Monitoramento de voo

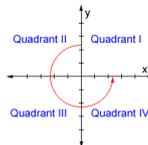
CÓDIGO:			
ID	RPA 1	RPA 2	RPA 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

CÓDIGO:			
ID	RPA 1	RPA 2	RPA 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

CÓDIGO:			
ID	RPA 1	RPA 2	RPA 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

**Parâmetros a serem checados:**

**Q:** Quadrante em relação a área de voo em que se encontra a aeronave (I, II, III ou IV):



**V:** Velocidade indicada da aeronave em metros por segundo

**H:** Altura da aeronave em relação ao solo em metros

**D:** Distância horizontal da aeronave em relação ao ponto de decolagem em metros

## B.2 Ficha com os procedimentos anormais e de emergência (etapa 2)

### Procedimento de emergência

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO: \_\_\_\_\_

Qual o procedimento a ser executado?

*Assinale com um X*

<b>Etapa 1</b>	
A	Iniciar preparação para troca de tranque. Após o pouso, desarmar a aeronave, trocar o tanque vazio pelo cheio, checar o encaixe e realizar procedimento de decolagem.
B	Identificar visualmente a posição da aeronave e confirmar o retorno para pouso. Checar periodicamente se a comunicação foi reestabelecida. Em caso positivo, monitorar o retorno através também através da tela.
C	Monitorar a trajetória de retorno da aeronave. Caso a aeronave apresente comportamento anormal, acionar pouso imediato.
<b>Etapa 2</b>	
A	Iniciar preparação para troca de tranque. Após o pouso, desarmar a aeronave, trocar o tanque vazio pelo cheio, checar o encaixe e realizar procedimento de decolagem.
B	Identificar visualmente a posição da aeronave e confirmar o retorno para pouso. Checar periodicamente se a comunicação foi reestabelecida. Em caso positivo, monitorar o retorno através também através da tela.
C	Monitorar a trajetória de retorno da aeronave. Caso a aeronave apresente comportamento anormal, acionar pouso imediato.
<b>Etapa 3</b>	
A	Iniciar preparação para troca de tranque. Após o pouso, desarmar a aeronave, trocar o tanque vazio pelo cheio, checar o encaixe e realizar procedimento de decolagem.
B	Identificar visualmente a posição da aeronave e confirmar o retorno para pouso. Checar periodicamente se a comunicação foi reestabelecida. Em caso positivo, monitorar o retorno através também através da tela.
C	Monitorar a trajetória de retorno da aeronave. Caso a aeronave apresente comportamento anormal, acionar pouso imediato.



## B.4 Ficha com as instruções para a escala NASA-TLX

### NASA Task Load Index (TLX)

#### Escala de classificação

O interesse desse estudo não é avaliar apenas o seu desempenho, mas as experiências que você teve durante as diferentes condições de teste. Agora nós vamos descrever uma das técnicas utilizadas para examinar suas experiências.

No sentido mais genérico o objetivo dessa técnica é avaliar a “carga de trabalho” que você experenciar. Os fatores que influenciam essa carga de trabalho podem vir tanto do tipo da tarefa a ser executada em si quanto de como você se interage com essa tarefa, ou seja, seus sentimentos em relação ao seu desempenho, quanto esforço você está dedicando a execução ou o estresse a frustração que você sentiu. A carga de trabalho também pode variar à medida que você se familiariza com a tarefa ou a medida em que o grau de dificuldade dessa tarefa se altera (mais fácil ou mais difícil).

Uma das formas de mensurar a carga de trabalho é pedir as pessoas para que elas descrevam os sentimentos que ela experimentou durante a realização de determinada tarefa. Como a carga de trabalho pode ser causada por diferentes fatores, nós gostaríamos de avaliar cada um desses fatores individualmente, ao invés de em uma única escala global. Um conjunto de seis escalas foi desenvolvido para que você possa usar na avaliação de suas experiências durante a realização das diferentes etapas do teste. Por favor, leia as descrições das escalas com cuidado. Em caso de qualquer dúvida acerca das definições, não hesite em questionar. É fundamental que o conceito de cada escala esteja claro para você.

Após cada etapa, você receberá uma ficha com as escalas de classificação. Você deve avaliar a etapa como um todo marcando com um “X” em cada uma das seis escalas com a “intensidade” correspondente a sua experiência naquela etapa. Cada escala corresponde a uma linha, e em cada extremo dessa linha há uma breve descrição da escala. Atenção especial para a escala de desempenho pessoal, que vai de “bom” na esquerda para “ruim” na direita.

Por favor, considere suas respostas cuidadosamente para diferenciar as diferentes condições de teste. Cada escala deve ser considerada individualmente. Suas classificações são fundamentais para a avaliação que está sendo conduzida e o sucesso do experimento depende delas.

DEFINIÇÃO DAS ESCALAS DE CLASSIFICAÇÃO		
Título	Extremos	Descrição
DEMANDA MENTAL	<i>Muito baixa/ Muito alto</i>	Quanta demanda mental e atividade de percepção foi exigida (e.g., pensar, decidir, calcular, lembrar, olhar, procurar, identificar, comparar, etc.)? A tarefa foi simples ou complexa, fácil ou difícil, exigente ou tranquila?
DEMANDA FÍSICA	<i>Muito baixa/ Muito alto</i>	Quanta atividade física foi requerida (e.g., empurrar, puxar, girar, controlar, ativar, etc.)? A tarefa foi fácil ou difícil, lenta ou rápida, tranquila ou extenuante, sossegada ou trabalhosa?
DEMANDA TEMPORAL	<i>Muito baixa/ Muito alto</i>	Quanta pressão de tempo você sentiu devido ao ritmo da tarefa/elementos da tarefa? O ritmo foi lento e vagaroso ou rápido e frenético?
DESEMPENHO	<i>Muito bom/ Muito ruim</i>	Quão bem sucedido você acredita que foi em alcançar os objetivos da tarefa definidos pelo instrutor? E os definidos por você? Quão satisfeito você ficou com seu desempenho em alcançar esses objetivos?
ESFORÇO	<i>Muito baixa/ Muito alto</i>	Quão arduamente você teve que trabalhar (mentalmente e fisicamente) para alcançar o nível de desempenho apresentado?
NÍVEL DE FRUSTRAÇÃO	<i>Muito baixa/ Muito alto</i>	Quão inseguro, desencorajado, irritado, estressado e incomodado versus seguro, gratificado, contente, relaxado e complacente você se sentiu durante os testes?

### **Avaliação das fontes de carga de trabalho**

Nesse experimento, as escalas de classificação são utilizadas para avaliar suas experiências nas diferentes condições da tarefa. Essas escalas são extremamente úteis, apesar de sofrerem com a tendência que as pessoas têm de interpretá-las de forma subjetiva. Por exemplo, algumas pessoas podem considerar que as demandas mentais ou temporais são os aspectos essenciais para a carga de trabalho, independente do esforço ou do desempenho. Outros interpretam que caso elas tenham um desempenho ótimo, a carga de trabalho deve ter sido baixa (e *vice-versa*). Outros ainda podem sentir que o esforço ou a frustração são os fatores mais relevantes.

A avaliação que você está prestes a executar é uma técnica para avaliar a importância relativa dos seis fatores na determinação da carga de trabalho global experimentada. O procedimento é simples: apresentaremos para você uma série de pares de títulos de escalas de classificação e você deve escolher qual daqueles dois itens foi o mais importante para sua experiência de carga de trabalho na tarefa apresentada. Cada par de títulos aparecerá em cartões separados.

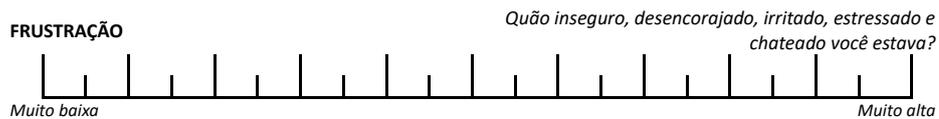
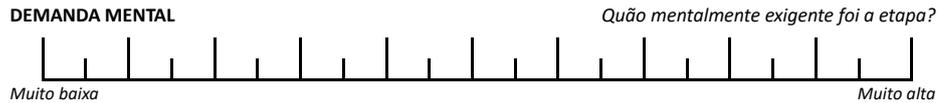
**Circule o título da escala que representa a contribuição mais importante para a carga de trabalho daquela tarefa que você desempenhar nesse experimento.**

Após você finalizar toda a série, nós utilizaremos suas seleções para criar uma combinação com pesos da intensidade que você marcou nas escalas.

Por favor, considere suas respostas cuidadosamente para diferenciar as diferentes condições de teste. Cada escala deve ser considerada individualmente. Suas classificações são fundamentais para a avaliação que está sendo conduzida e o sucesso do experimento depende delas.

**B.5 Ficha com a escala NASA-TLX****FICHA DE CLASSIFICAÇÃO- NASA TLX**

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO: \_\_\_\_\_





***EESC • USP***