

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Materiais, Manufatura e Automação.

Diego Hernandez Arjoni

**REALIDADE AUMENTADA NO TREINAMENTO DO
VOO EM FORMATURA BÁSICA: UMA ANÁLISE DE
FATORES HUMANOS**



Prof^a. Dr^a. Emília Villani
Orientadora

Dr. José Márcio Pereira Figueira Maj. Eng.
Coorientador

Prof^a. Dr^a. Emília Villani
Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Arjoni, Diego Hernandez
Realidade Aumentada No Treinamento Do Voo Em Formatura Básica: Uma Análise De Fatores Humanos / Diego Hernandez Arjoni.
São José dos Campos, ano.
164f.

Tese de doutorado – Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Materiais, Manufatura e Automação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. Orientador: Prof. Dr. Nome do Orientador

1. Realidade aumentada. 2. Voo em formação. 3. Fatores humanos. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Arjoni, Hernandez Diego. **REALIDADE AUMENTADA NO TREINAMENTO DO VOO EM FORMATURA BÁSICA: UMA ANÁLISE DE FATORES HUMANOS**. 2021. 160f. Tese de doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Materiais, Manufatura e Automação.– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2021

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Diego Hernandez Arjoni
TÍTULO DO TRABALHO: Realidade Aumentada no Treinamento do Voo em Formatura Básica: Uma Análise De Fatores Humanos
TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2021

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Diego Hernandez Arjoni
Rua Emílio Marelo 100 62C
CEP: 12.241-200, São José dos Campos - SP

**REALIDADE AUMENTADA NO TREINAMENTO DO VOO EM FORMATURA
BÁSICA: UMA ANÁLISE DE FATORES HUMANOS**

Diego Hernandez Arjoni

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Luís Gonzaga Trabasso	Presidente	-	ITA
Profa. Dra.	Emília Villani	Orientador	-	ITA
Prof. Dr.	José Márcio Pereira Figueira	Coorientador	-	IPEV
Prof. Dr.	Roberto Gil Annes da Silva	Membro interno	-	ITA
Prof. Dr.	Jorge Henrique Bidinotto	Membro externo	-	EESC -USP
Prof. Dr.	Ricardo Sutério	Membro externo	-	INPE

ITA

*Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo e nunca se arrepende.*

(Leonardo da Vinci)

Dedicatória

Durante o longo período de um doutorado, muitas pessoas passam por nossas vidas, muitas pessoas entram e muitas nos deixam. Poucos são os que acompanham de perto para entender a importância desta caminhada para quem a trilha. Menos ainda são os que decidem caminhar ao lado, dividindo os altos e baixos.

Um trabalho como este nos faz prestar atenção na passagem do tempo e na importância de entender que este é finito para nós. Por isso, àqueles que sempre acreditaram que a luz do fim do túnel existia, mesmo quando eu não conseguia enxergar, àqueles que levantaram minha cabeça e me fizeram continuar, àqueles que entenderam que em determinados momentos, não é necessário fazer nada, apenas estar presente, eu os agradeço do fundo do coração. Ninguém caminha sozinho e o que é concreto é realizado pelas mãos de muitos.

Dedico, em especial este trabalho à Vitória Fernandes Pereira, minha noiva, que acompanhou de perto, sorriu e sofreu comigo todos os momentos desta jornada. Espero te fazer sorrir sempre, mas estarei ao seu lado quando precisar chorar como você sempre esteve do meu. Passamos por muitas coisas juntos e moldamos a vida um do outro. Se sou o que sou, agradeço a você. Eu te amo.

Dedico também este trabalho a minha avó Anna Lúcia Pereira Hernandez, ao meu avô Domingos Hernandez, à minha mãe Edite Hernandez Arjoni e ao meu pai Marcos Arjoni. Vocês acompanharam minha caminhada completa e sinto o carinho de vocês em mais esta vitória. Sou imensamente grato por ter vocês em minha vida. Aprendi muito com cada um. Tenho a força e o amor de vocês comigo e vou carregá-los eternamente no meu coração. Amo todos vocês.

Agradeço ainda à minha orientadora Emília Villani e meu coorientador José Marcio Pereira. Foram períodos difíceis, mas sou grato por acreditarem em mim desde o começo desta jornada. Aprendi muito com vocês e esse é um dos maiores presentes que podemos ter neste mundo.

Por fim, deixo um agradecimento especial a todos os meus colegas do CCM e da Mauá, em especial ao Professor Anderson Harayashiki, responsável por me guiar pelo caminho acadêmico.

Resumo

O treinamento de pilotos tem sido, há décadas, auxiliado pelo uso de simuladores de voo com diferentes características e graus de fidelidade. Contudo, muitos estudos indicam que, apesar da reconhecida contribuição do treinamento em simulador, a prática em voo real ainda é necessária, dependendo da tarefa treinada. Algumas pesquisas apontam que medidas psicofisiológicas do piloto sofrem alterações do voo real para o voo simulado, afetando a transferência de treinamento e reforçando a necessidade de se manter, em alguma medida, o treinamento no voo real. Considerando o acima exposto, esta tese aborda o problema de treinamento do voo em formatura básica. Este voo requer a utilização de, no mínimo, duas aeronaves, resultando em custo operacional elevado e risco de colisão entre as aeronaves. Para contornar este problema, propõe-se o uso de realidade aumentada em voo, com objetivo de substituir a aeronave Líder por uma representação virtual e proporcionar um treinamento próximo do voo real, mas com custo e risco de colisão reduzidos. Como contribuição científica, investiga-se os benefícios e limitações deste ambiente de treinamento quando comparada com outras opções. Conclui-se que dois fatores são influenciados pela presença dos óculos de realidade aumentada em voo: performance e carga de trabalho, contudo o nível de stress e a transferência de treinamento permanecem constantes com ou sem o uso dos óculos.

Abstract

Pilot training has been, for decades, aided by flight simulators with different characteristics and degrees of fidelity. However, many studies indicate that, despite the recognized contribution of simulator training, actual flying practice is still necessary, depending on the trained task. Some researchers show that the pilot's psychophysiological measures undergo alterations from the real flight to the simulated flight, affecting the transfer of training and reinforcing the need to maintain, to some extent, the training in the real flight. Considering the above, this work addresses the problem of basic formation flight training. This flight requires the use of at least two aircraft, resulting in high operational costs and risk of collision between aircraft. One way to overcome this problem is using augmented reality in flight, with the objective of replacing the leader aircraft with a virtual representation of it and providing a scenery close to real flight, but with reduced cost and risk of collision. As a scientific contribution, we investigate the benefits and limitations of training using augmented reality in a simulated environment, when compared with the usual training in a static simulator for the flight scenario in basic formation flight. It is concluded that two factors are influenced by the presence of augmented reality glasses in flight: performance and workload. However, the level of stress and the transfer of training with or without the use of glasses remains constant.

Índice de Figuras

Figura 1-1. Possíveis etapas de treinamento.....	19
Figura 1-2. Os ciclos da abordagem metodológica DSR (HEVNER, 2006).....	23
Figura 2-1. <i>Formation Flight Trainer (FFT)</i> (WOOD, HAGIN, <i>et al.</i> , 1972).	26
Figura 2-2. Desempenho calculado dos pilotos ao longo do treinamento.....	28
Figura 2-3. Aeronaves real e projetada no sistema <i>A-TARS</i> (RED6, 2019).	34
Figura 3-1. Modelo proposto por Rasmussen. Adaptado de (RASMUSSEN, 1983).....	38
Figura 3-2. Modelo proposto por Endsley. Adaptado de (ENDSLEY, 1995).	40
Figura 3-3. <i>NASA TLX</i>	43
Figura 3-4. Onda PQRST.	45
Figura 4-1. Da realidade ao ambiente virtual.	48
Figura 4-2. Utilização do <i>Slab3D</i> no Projeto <i>ARSAD</i>	49
Figura 4-3. Colete <i>TSAS</i>	50
Figura 4-4. <i>Checklist</i> em realidade aumentada (PEREZ e BEHREND, 2019).	50
Figura 4-5. <i>Gyro Gunsight MK IID</i> (<i>Gyro Gunsight Mk IID</i> , 1944), (CUNNINGHAM, FORD, <i>et al.</i> , 1944) (VINTAGE AVIATION, 2019).	51
Figura 4-6. Exemplo <i>HUD/EFVS</i> (SAAB, 2019).	52
Figura 4-7. Rockwell Collins <i>HMD</i> (COLLINS AEROSPACE, 2019).	53
Figura 4-8. <i>Google Glass</i> (GOOGLE, 2019).	54
Figura 4-9. Equipamentos de realidade aumentada disponíveis no CCM.....	55
Figura 5-1. <i>Eye-tracker Tobii Pro Glasses 2</i>	59
Figura 5-2. Mapas de calor obtidos a partir de dados do <i>eye-tracker</i>	62
Figura 5-3. Mapa de calor do voo em formação.....	64
Figura 5-4. Fluxograma do voo em formatura básica.	66

Figura 6-1. a) Voo real total; b) Voo real com Líder holográfico; c) Voo simulado com Líder projetado em tela; d) Voo simulado com Líder holográfico;	69
Figura 6-2. <i>Cockpit</i> do Simulador SIVOR.	70
Figura 6-3. Arquitetura do simulador SIVOR.	71
Figura 6-4. Arquitetura do simulador SIVOR com sistema de realidade aumentada.	72
Figura 6-5. Fluxo geral do <i>Plug-in</i> de Voo em Formação.	74
Figura 6-6. Funções nativas do <i>plug-in</i> X-Plane.	75
Figura 6-7. <i>Flight Loop Callback 0</i>	76
Figura 6-8. <i>Flight Loop Callback 1</i>	76
Figura 6-9. <i>Flight Loop Callback 2</i>	77
Figura 6-10. Visualização da aeronave Líder sem (à direita) e com (à esquerda) oclusão da aeronave pelo <i>cockpit</i>	79
Figura 6-11. <i>Spatial awareness</i> do <i>Hololens</i>	80
Figura 6-12. Uso de marcador <i>Vuforia</i>	80
Figura 6-13. Imagem alvo do <i>Vuforia</i>	81
Figura 6-14. Avião localizado no <i>Unity</i>	81
Figura 6-15. Ponto de vista da câmera <i>Unity</i>	82
Figura 6-16. Avião de realidade aumentada em formação nivelado.	82
Figura 6-17. Avião de realidade aumentada em formação em curva.	82
Figura 6-18. Da esquerda para direita: modelo escanado, modelo composto por peças separadas de console e <i>cockpit</i> ; modelo 3D final.	83
Figura 6-19. <i>Cockpit</i> da perspectiva do piloto.	84
Figura 6-20. Movimentação de elementos com relação hierárquica no mundo <i>Unity</i>	84
Figura 6-21. Fluxograma da rotina de calibração.	85

Figura 6-22. Coluna central do modelo virtual do <i>cockpit</i> (vermelho) se sobrepondo ao <i>cockpit</i> real.....	86
Figura 6-23. Janela do modelo virtual do <i>cockpit</i> (vermelho) se sobrepondo ao <i>cockpit</i> real.	86
Figura 6-24. Transformação de coordenadas para posicionamento relativo da aeronave Líder.	87
Figura 6-25. Sistema de movimentação baseado em hierarquia.	89
Figura 6-26. Interface do Sistema Supervisório AR.	91
Figura 6-27. Voo em formação sem uso de realidade aumentada.	92
Figura 6-28. Voo em formação com aeronave Líder projetada em realidade aumentada.	92
Figura 6-29. Avião projetado em realidade aumentada pareado com avião do simulador.	93
Figura 7-1. Fatores de influência no comportamento humano, de acordo com modelo proposto por Endsley (1995) adaptado pelo autor.	94
Figura 7-2. Tarefa de treinamento	103
Figura 7-3. Limites de distância sinalizados ao piloto pela esfera de cores.	105
Figura 8-1. Piloto com baixa performance de formação.	112
Figura 8-2. Piloto com alta performance de formação.	113
Figura 8-3. Resíduos com tendência não linear sobre a reta.	114
Figura 8-4. Curva exponencial aproximada com R^2 0,846.	115
Figura 8-5. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Ln(MeanMod).	116
Figura 8-6. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Ln(StdMod)	116
Figura 8-7. Boxplot para Ln(MeanMod).	117
Figura 8-8. Boxplot para Ln(StdMod).	118
Figura 8-9. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – T250.	119
Figura 8-10. Boxplot para o fator C – Variáveis T250.	120
Figura 8-11. Boxplots de Fatores <i>TLX</i> separados.	122

Figura 8-12. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – ScoreTLX.	123
Figura 8-13. Boxplot para Variável ScoreTLX.	124
Figura 8-14. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável BMP.	126
Figura 8-15. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável RRI.	126
Figura 8-16. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LnLF.	126
Figura 8-17. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LnHF.	127
Figura 8-18. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LF/HF.	127
Figura 8-19. Boxplot para o fator C – Variável BPM.	129
Figura 8-20. Boxplot para o fator C – Variável RRI.	129
Figura 8-21. Boxplot para o fator C – Variável LnLF.	130
Figura 8-22. Boxplot para o fator C – Variável LnHF.	131
Figura 8-23. Boxplot para o fator C – Variável LF/HF.	131
Figura 8-24. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável GSR.	133
Figura 8-25. Boxplot para o fator C – Variável GSR.	134
Figura A1-1. Exemplo de gráfico Q-Q.	157

Índice de Tabelas

Tabela 4-1. Análise comparativa (EPSON, 2019), (MICROSOFT, 2019), (SAMSUNG, 2019).....	56
Tabela 5-1. Distribuição das situações de voo por piloto.....	60
Tabela 5-2. Respostas ao questionário de <i>Cooper-Harper</i>	62
Tabela 5-3. Respostas ao questionário de Bedford.....	63
Tabela 6-1. Comandos de teclado para ajuste fino.....	86
Tabela 7-1. Potenciais fatores de análise.....	96
Tabela 7-2. Dinâmica dos fatores em análise.....	97
Tabela 8-1. Resultados iniciais da análise de performance	114
Tabela 8-2. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Ln(MeanMod) e Ln(StdMod).	115
Tabela 8-3. Análise de variância - LnMeanMod e LnStdMod.....	117
Tabela 8-4. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – T250.	119
Tabela 8-5. Análise de variância – T250.....	119
Tabela 8-6. Resultados para fatores TLX separados.	122
Tabela 8-7. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias - ScoreTLX.....	123
Tabela 8-8. Análise de variância – ScoreTLX.	123
Tabela 8-9. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Variáveis ECG.....	125
Tabela 8-10. Análise de variância – Variáveis ECG.....	128
Tabela 8-11. Impacto do aumento de stress nas variáveis ECG.....	128
Tabela 8-12. Teste de Tukey– Variáveis ECG.....	132
Tabela 8-13. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Variável GSR.	133
Tabela 8-14. Análise de variância – Variável GSR.....	134

Tabela 8-15. Teste de Tukey – Variável SCR.....	135
Tabela 8-16. Testes de normalidade e Homogeneidade de Variâncias dos dados	136
Tabela 8-17. Distância média entre as aeronaves, em metros – Variável MeanMod.....	137
Tabela 8-18. Teste-t entre momentos – Variável MeanMod.....	137
Tabela 8-19. Desvio padrão da distância, em metros – Variável StdMod.	138
Tabela 8-20. Testes-t do desvio padrão – Variável StdMod.	138
Tabela 8-21. Tempo em formação, em segundos – Variável T250.....	139
Tabela 8-22. Testes-t para o tempo de formação – Variável T250.	139
Tabela A2-1. Dados de performance calculados.	159
Tabela A2-2. Dados do NASA-TLX.....	161
Tabela 11-3. Dados fisiológicos calculados.	163

Sumário

DEDICATÓRIA	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Hipóteses.....	21
1.2 Objetivo	22
1.3 Metodologia.....	22
1.4 Organização do texto.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Transferência de treinamento em voos simulados e reais.....	26
2.2 Comparações psicofisiológicas entre voos simulados e voos reais	29
2.3 Treinamento embarcado e simulação virtual em ambiente real de voo	32
2.4 Considerações finais do capítulo	35
3 FATORES HUMANOS NA AVIAÇÃO	37
3.1 Modelos do comportamento humano	37
3.1.1 <i>Modelo proposto por Rasmussen</i>	<i>37</i>
3.1.2 <i>Modelo proposto por Endsley.....</i>	<i>39</i>
3.2 Métodos de avaliação de fatores humanos	41
3.2.1 <i>Métricas de performance</i>	<i>42</i>
3.2.2 <i>Escalas Subjetivas</i>	<i>42</i>
3.2.3 <i>Medidas fisiológicas</i>	<i>44</i>
3.3 Considerações finais do capítulo	46
4 REALIDADE AUMENTADA.....	47
4.1 O conceito de realidade aumentada	47

4.2	Dispositivos para Realidade Aumentada.....	51
4.3	Seleção de dispositivo de realidade aumentada	55
4.4	Considerações finais do capítulo	58
5	ANÁLISE DE DADOS DE VOO REAL	59
5.1	Campanha de voo	59
5.2	Processamento dos dados coletados	61
5.3	Voo em formação básica	65
5.4	Considerações Finais do Capítulo	66
6	DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO	68
6.1	Arquitetura do protótipo integrado ao simulador SIVOR.....	70
6.2	<i>Plug-in AR</i>	72
6.3	Sistema Embarcado <i>AR</i>	78
6.3.1	Posicionamento de elementos ativos e passivos.....	78
6.3.2	Controle da aeronave Líder e geração de trajetória	87
6.4	Sistema Supervisório <i>AR</i>	90
6.5	Considerações finais do capítulo	93
7	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	94
7.1	Seleção de Fatores e Métricas de Análise	94
7.1.1	Experiência e treinamento	97
7.1.2	Carga de trabalho.....	98
7.1.3	<i>Stress</i>	99
7.2	Projeto do Experimento	100
7.2.1	Definição de hipóteses a serem avaliadas.....	101
7.2.2	Perfil dos participantes	101
7.2.3	Procedimento experimental	101
7.3	Processamento dos dados.....	104

7.3.1	Dados coletadas e variáveis calculadas	104
7.3.2	Modelos estatísticos para verificação das hipóteses.....	107
7.4	Considerações finais do capítulo	110
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	111
8.1	Realização do experimento	111
8.2	Resultados de Performance	112
8.2.1	Média e Desvio Padrão do Módulo da Distância de Formação	113
8.2.2	Tempos de Formação.....	118
8.2.3	Análise da hipótese H_2	120
8.3	Análise da carga de trabalho	120
8.3.1	NASA-TLX	121
8.3.2	Análise da hipótese H_3	124
8.4	Análise de <i>stress</i>	125
8.4.1	ECG	125
8.4.2	GSR	132
8.4.3	Análise da hipótese H_4	135
8.5	Análise da transferência de treinamento.....	136
8.5.1	Performance no início e no final do treinamento	136
8.5.2	Análise da hipótese H_1	139
8.6	Considerações finais do capítulo	140
9	CONCLUSÃO.....	141
9.1	Trabalhos Futuros	145
10	REFERÊNCIAS	146
APÊNDICE 1	156
A1.1.	ANOVA	156

A1.2. Teste de Normalidade Gráfico	157
A1.3. Teste de Normalidade Analítico	157
A1.4. Teste de Homogeneidade de Variâncias	158
APÊNDICE 2	159

1 Introdução

O problema de prover um treinamento adequado a pilotos, com segurança, eficiência e custo reduzido, acompanha a aviação desde os seus primórdios. Neste contexto, o uso de simuladores de voo, com diferentes características e graus de fidelidade, tem sido uma abordagem adotada há décadas. Como exemplo, cita-se o *Link Trainer*, primeiro simulador comercialmente disponível, de base móvel, introduzidos por Ed Link para o treinamento de pilotos em voo por instrumentos, ainda na década de '30 (LINK, 1931).

Com objetivo de investigar os limites do uso de simuladores, a transferência de treinamento, também conhecida pelo termo em inglês *Transfer of Training* (ToT), tem sido um constante tópico de pesquisa (VALVERDE, 1973), (HAYS, JACOB, *et al.*, 1992), (ORITZ, 1993), (SAVERN REWETI, 2017). Entende-se como transferência de treinamento a quantidade de conhecimento e habilidades transferidas do ambiente de treinamento para o ambiente real (ALLERTON, 2009), (LEE, 2016). As diversas revisões realizadas na literatura indicam que a transferência de treinamento depende da tarefa treinada, do ambiente de treinamento e do método utilizado para avaliação (HAYS, JACOB, *et al.*, 1992), (TELFER, 1993), (BELL e WAAG, 1998). Particular atenção tem sido dedicada à investigações sobre a necessidade de integrar um sistema de movimentação ao simulador de voo e a influência da sensação de movimento na aprendizagem e no comportamento do piloto (BÜRKI-COHEN e GO, 2005), (BÜRKI-COHEN, SPARKO e BELLMAN, 2011), (JONES, WHITE, *et al.*, 2017), (OLIVEIRA, MATHEUS, *et al.*, 2019).

Apesar da reconhecida contribuição do treinamento em simulador para aviação, alguns estudos indicam que o treinamento em voo real ainda é necessário, dependendo da tarefa treinada (ROESSINGH, 2005). Diferentes pesquisas indicam também que as reações psicofisiológicas e endócrinas do piloto sofrem alterações do voo real para o voo simulado (VELTMAN, 2002), (JOHANNES, ROTHE, *et al.*, 2017) e (LEINO, 1999). Os resultados obtidos em geral apontam para níveis de *stress* e carga de trabalho mais elevados no voo real. De forma complementar, algumas pesquisas apontam ainda para influência do nível de *stress* na eficiência do treinamento (MCCLERNON, 2009), (MCCLERNON, MCCAULEY, *et al.*, 2011).

Apesar do volume de trabalhos já publicados relativos à transferência de treinamento e ao uso de simuladores de voo, a caracterização dos limites e benefícios de diferentes ambientes de treinamento permanece um problema em aberto, cuja resposta depende de uma série de

fatores, tais como as características do ambiente, a experiência do piloto, as características da manobra treinada, entre outros.

Considerando o acima exposto, caracterizam-se tradicionalmente duas etapas no treinamento de pilotos: o treinamento em simulador e o treinamento em voo. Com as tecnologias associadas a digitalização, adicionam-se a essas duas etapas, duas novas possibilidades. A primeira delas é o treinamento em ambiente de realidade virtual, que é analisado por diversos autores, (LABEDAN, DARODES-DE-TAILLY, *et al.*, 2021). (AUER, GERKEN, *et al.*, 2021).

A segunda opção, que é analisada nesta tese, corresponde ao uso de realidade aumentada em voo para criar um cenário de treinamento. Nesse caso, elementos externos à aeronave são visualizados pelo piloto durante o voo utilizando um dispositivo de realidade aumentada. Essa proposta permite flexibilidade e diversidade na criação de configurações de cenários e pode ser utilizada para diferentes tipos de treinamento, tais como reconhecimento de aeronave em missão de interceptação, busca e resgate, combate ar-ar combate ar-solo, apoio aéreo aproximado, cenários de guerra irregular (cenários envolvendo combate entre exércitos e facções, milícias, grupos terroristas etc.) (POSSAMAI, 2020)

A Figura 1-1 ilustra as etapas de treinamento mencionadas, em ordem de aumento de risco, custo e fidelidade, posicionando aquela considerada nessa tese entre o treinamento em simulador de voo e o treinamento em cenário real.

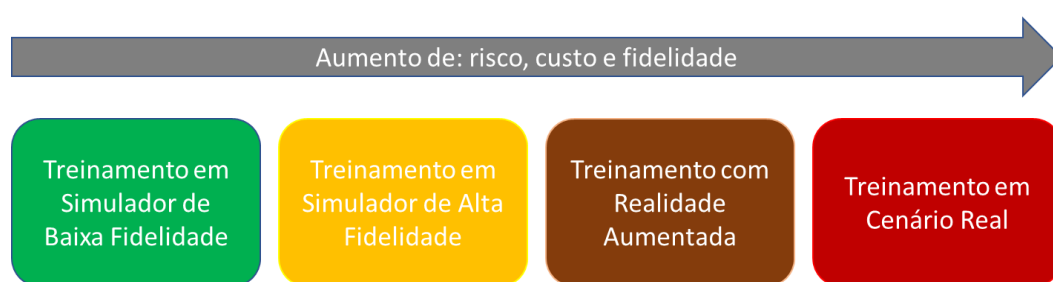


Figura 1-1. Possíveis etapas de treinamento.

Na presente tese, aborda-se, como aplicação para o uso da realidade aumentada em voo, o treinamento de pilotos para voos em formação. O voo em formatura básica é uma missão de grande importância tática para a aeronáutica. O treinamento deste tipo de voo exige a atuação simultânea de, no mínimo, duas aeronaves, o que impõe dificuldades operacionais, logísticas e financeiras adicionais quando comparado ao treinamento em voos isolados.

Além disso, o treinamento do voo em formação introduz um fator de risco adicional, associado à proximidade entre as aeronaves. Este fator de risco é evidenciado nos diferentes

acidentes resultantes de colisões em voo (MCSPADDEN, 2019), (BCAA, 2016), (DICKSTEIN, 2019). As potenciais limitações do treinamento em simulador e as dificuldades associadas ao treinamento em voo real da formação básica motivam esta tese. De forma resumida, esta tese investiga, para o caso do voo em formatura básica, a opção de treinamento em voo real com elementos virtuais representando a aeronave Líder, caracterizando um ambiente de realidade aumentada, mitigando risco intrínseco a esse tipo de voo e reduzindo o custo associado ao treinamento. Como premissa para esta tese, considera-se a hipótese de que o treinamento usando aeronaves reais pode ser substituído, em alguma medida, por treinamento em voo real com aeronave Líder virtual, sem prejuízo para o aprendizado.

Contextualizando a presente tese, observa-se que, dentre as iniciativas de utilização de sistemas de realidade aumentada incorporados ao voo real detalhadas na literatura, destacam-se os sistemas desenvolvidos pelo centro aeroespacial holandês - *National Aerospace Laboratory* (NLR), que tem como foco o treinamento de combate aéreo. As soluções apresentadas propõem a sobreposição de ambientes reais e virtuais para simulação de situações de combate “Além do Alcance Visual” (BVR - *Beyond Visual Range*) (ROESSINGH, VAN SIJLL e JOHNSON, 2003), (KRIJN e WEDZINGA, 2004). Uma extensão do conceito de treinamento embarcado para situações de combate visual é apontada como um desafio ainda a ser resolvido (LEMMERS, 2008), (TASK GROUP HFM-165, 2014). Este desafio vem recebendo atenção e esforços por parte de empresas do setor. Em particular, destaca-se o sistema em desenvolvimento pela empresa RED6, que propõem a sobreposição de elementos 3D virtuais, ao campo de visão do piloto durante um voo real (ROBINSON e BICANIC, 2019).

Tanto os trabalhos desenvolvidos no NLR quanto a proposta da empresa RED6 sinalizam que os eventuais gargalos tecnológicos associados ao uso de realidade aumentada para treinamento em voo devem ser resolvidos num futuro próximo. No entanto, em ambos os casos, observa-se como lacuna a falta de uma avaliação sistemática do impacto no treinamento dos pilotos da substituição de objetos reais do por objetos virtuais, em particular no que se refere a fatores como carga de trabalho, stress e desempenho. Além disso, observa-se que o caso do voo em formação não é abordado em nenhum dos trabalhos apresentados.

1.1 Hipóteses

Este trabalho se apoia nas seguintes hipóteses:

- *Hipótese A: Para o caso do voo em formação, a transferência de treinamento do voo em simulador para o voo real não é completa, impondo a necessidade de se manter, em alguma medida, o treinamento em voo real.*

A hipótese A é suportada pelos trabalhos publicados na literatura que indicam diferenças, sob a perspectiva do piloto, entre o voo real e o voo simulado. Com base nesta hipótese, descarta-se a solução de realizar todo o treinamento do voo em formação exclusivamente em simulador – solução cujo custo e risco seria obviamente inferior.

- *Hipótese B: Nas etapas iniciais do treinamento de voo em formação, a projeção do Líder utilizando a tecnologia de realidade aumentada permite aprendizado semelhante ao obtido com a visualização da aeronave real.*

Esta é a hipótese principal desta tese, investigada por meio de experimentos realizados utilizando uma prova de conceito de um sistema de realidade aumentada integrada em ambiente de simulação. Apesar da limitada validade dos resultados obtidos no ambiente de simulação, considera-se essa uma etapa essencial na análise de viabilidade do treinamento baseado no uso de realidade aumentada em voo.

- *Hipótese C: A realização de experimentos em ambiente de simulação permite conclusões que podem ser generalizadas para o voo real.*

A hipótese de que experimentos em ambiente de simulação permitem conclusões sobre situações de voo real tem sido extensivamente adotada na literatura científica desde os primórdios da Aeronáutica.

Apesar do aparente contrassenso, pois é exatamente a diferença entre o voo real e o voo simulado que justifica a proposta de uso de realidade aumentada em voo para treinamento, considera-se que diversos aspectos da substituição da aeronave Líder real por projeção em realidade aumentada podem ser avaliados num ambiente de simulação de alta fidelidade, ainda que de forma limitada e carecendo de posterior confirmação em voo.

Considera-se que a validação desta hipótese, que implicaria no desenvolvimento e uso de um sistema de realidade aumentada integrado a uma aeronave num voo real, extrapola o escopo proposto para a tese.

1.2 Objetivo

O objetivo desta tese é a proposta do uso de realidade aumentada para treinamento de voo em formação, em substituição ao voo de uma aeronave Líder real e a caracterização do impacto sobre o piloto desta substituição. Tal caracterização é realizada em ambiente de simulação, como etapa inicial da análise de viabilidade no desenvolvimento de um produto. O escopo desta tese limita-se ao caso do voo em formatura básica, onde a realidade aumentada é utilizada para a projeção da aeronave Líder no campo de visão do piloto.

Este objetivo desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma prova de conceito de sistema de realidade aumentada para o voo em formação básica;
- Proposta de métricas para análise comparativa da transferência de treinamento realizado em diferentes ambientes, combinando medidas psicofisiológicas e de desempenho;
- Proposta de campanha de experimentos para caracterização do sistema de realidade aumentada desenvolvido em ambiente de simulação.
- Caracterização do impacto sobre o piloto do sistema de realidade aumentada por meio da análise dos dados gerados na campanha de experimentos.

1.3 Metodologia

Adota-se nesta tese a abordagem metodológica *Design Science Research* (DSR), proposta por Hevner (2006)). Esta abordagem combina três ciclos principais (definição, implementação e avaliação), apoiados por um quarto ciclo (estado da arte), conforme ilustrado na Figura 1-2.

De forma simplificada, o ciclo de *estado da arte* suporta os três ciclos principais. Consiste em uma revisão da literatura para determinar o conhecimento existente relacionado ao projeto de pesquisa, garantindo sua inovação. Também suporta a escolha de métodos e métricas de avaliação. O ciclo de *definição* consiste em identificar oportunidades e problemas em um ambiente de aplicação atual/futuro. O ciclo de *implementação* propõe soluções alternativas para

os problemas e desafios identificados no ciclo de definição. Inclui a concepção de protótipos conceituais e demonstradores simples que serão entradas para o próximo ciclo. Finalmente, o ciclo de *avaliação* aplica as métricas selecionadas à saída do ciclo de implementação, a fim de avaliar até que ponto elas abordam os problemas e desafios identificados no ciclo de definição.

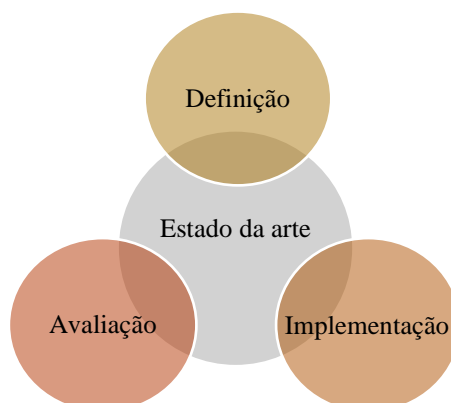


Figura 1-2. Os ciclos da abordagem metodológica DSR (HEVNER, 2006).

Conforme apresentado na introdução, esta tese investiga os benefícios e limitações do uso de realidade aumentada para treinamento de voo em formatura básica. Considerando este propósito, os ciclos da metodologia DSR são abordados na presente tese da seguinte forma:

- *Ciclo de definição.* A definição do problema abordado na tese é realizada com base nas conclusões obtidas a partir da revisão bibliográfica associada ao ciclo de estado da arte. Adicionalmente, como parte do ciclo de definição, investiga-se a viabilidade de uso do voo em formação para a presente tese com base na análise de dados fisiológicos coletados durante um experimento de voo real com aeronaves de asas rotativas (conforme detalhado no Capítulo 5).
- *Ciclo de estado da arte.* A revisão dos trabalhos publicados na literatura é dividida em duas partes:
 - Revisão bibliográfica com objetivo de caracterizar o problema abordado, suportar as hipóteses apresentadas e posicionar a proposta desta tese em relação aos trabalhos já publicados. Esta revisão, apresentada no Capítulo 2, aborda diferenças na transferência de treinamento em voo real e simulado, diferenças na percepção do piloto entre voos reais e voos simulados, observadas por meio de medidas psicofisiológicas e endócrinas e propostas existentes na literatura para treinamento em voo real com elementos simulados.

- Fundamentação teórica e tecnológica, apresentada nos Capítulos 3 e 4, tem o objetivo de introduzir os modelos clássicos utilizados para compreensão do comportamento do piloto. Apresenta-se também uma revisão de métodos utilizados na análise de fatores humanos, como carga de trabalho e stress, destacando-se o uso de escalas subjetivas e sensores fisiológicos. Para finalizar, apresentam-se os principais equipamentos de realidade aumentada disponíveis hoje, tanto para uso aeronáutico quanto para uso comum, e discutem-se algumas aplicações de realidade aumentada em voo.
- *Ciclo de implementação.* Inclui a implementação de uma prova de conceito para o voo em formação utilizando os equipamentos disponíveis no Centro de Competência em Manufatura (CCM) do ITA, conforme descrito no Capítulo 6.
- *Ciclo de avaliação.* Este ciclo inclui a especificação e execução de uma campanha de experimentos que explora o uso do protótipo conceitual desenvolvido no ciclo de implementação em um ambiente de simulação, conforme apresentado no Capítulo 7. O objetivo desta campanha é caracterizar o impacto sobre o piloto da substituição da aeronave Líder por uma aeronave virtual durante o treinamento de voo em formação.

1.4 Organização do texto

O texto desta tese está organizado da seguinte forma.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de trabalhos científicos sobre transferência de treinamento em voo real e em voo simulado, comparação de medidas psicofisiológicas do piloto obtidas em voo real e em voo simulado e iniciativas publicadas na literatura referentes ao treinamento em voo real com elementos virtuais. Esta revisão tem o propósito de suportar a hipótese apresentada no Capítulo 1 de que o treinamento em voo real é necessário, além de comprovar o ineditismo desta tese.

Os Capítulos 3 e 4 são dedicados à fundamentação teórica e tecnológica. O Capítulo 3 inicia com uma revisão sobre dois modelos de comportamento humano amplamente utilizados no setor aeronáutico. Em seguida, abordam-se métodos utilizados para avaliação de fatores humanos, como escalas subjetivas e medidas fisiológicas. Já no Capítulo 4 apresentam-se os dispositivos de realidade aumentada utilizados hoje dentro e fora do contexto aeronáutico. Para finalizar, com base na revisão realizada, seleciona-se um dispositivo de realidade aumentada, dentre dos disponíveis no Centro de Competência em Manufatura, para uso no protótipo a ser desenvolvido.

Na sequência, o Capítulo 5 apresenta uma análise da interface piloto-aeronave, baseada em dados coletados em voos reais, em diferentes manobras e fases de voo. Tais dados justificam a escolha do voo em formação como aplicação de treinamento na presente tese.

No Capítulo 6, descreve-se o desenvolvimento de um protótipo do tipo: prova de conceito de um sistema de realidade aumentada para treinamento de voo em formação básica. Apresenta-se também a integração desse protótipo no simulador SIVOR, disponível no Centro de Competência em Manufatura do ITA. O protótipo desenvolvido tem como finalidade permitir a realização de experimentos para avaliação do uso de realidade aumentada em voo.

O Capítulo 7 apresenta uma proposta de experimento para avaliação do impacto sobre o piloto do uso de realidade aumentada em voo, utilizando o protótipo descrito no capítulo anterior. Os resultados obtidos na campanha de experimento são discutidos no Capítulo 8.

Finalmente, o Capítulo 9 sumariza as conclusões obtidas no trabalho, apontando as principais contribuições desta tese. Discutem-se também propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão de trabalhos científicos relacionados a esta tese, com o propósito de suportar as hipóteses apresentadas no Capítulo 1 e comprovar o ineditismo da proposta desta tese.

A Seção 2.1 discute pesquisas que investigam a transferência de treinamento em voo real e em voo simulado. Na sequência, a Seção 2.2 aborda trabalhos que comparam medidas psicofisiológicas do piloto obtidas em voo real com aquelas obtidas em voo simulado. De forma complementar, a Seção 2.3 apresenta iniciativas publicadas na literatura referentes ao treinamento em voo real com elementos virtuais. Para finalizar, a Seção 2.4 resume as principais contribuições e lacunas da revisão bibliográfica apresentada, relacionando à proposta desta tese.

2.1 Transferência de treinamento em voos simulados e reais

Uma das primeiras pesquisas publicadas comparando a transferência de treinamento obtida a partir de voos realizados em simulador com aquela obtida a partir de voos reais é apresentada em (REID, 1975) e trata do treinamento para voo em formação. Reid discute os resultados de um experimento para verificar a eficiência de treinamentos realizados no *Formation Flight Trainer (FFT)*, um simulador de voo de base fixa com *cockpit* simplificado de uma aeronave T-38. Este simulador, ilustrado na Figura 2-1, projetava na tela esférica a imagem do avião Líder que deveria ser seguido pelo piloto em treinamento (WOOD, HAGIN, *et al.*, 1972).

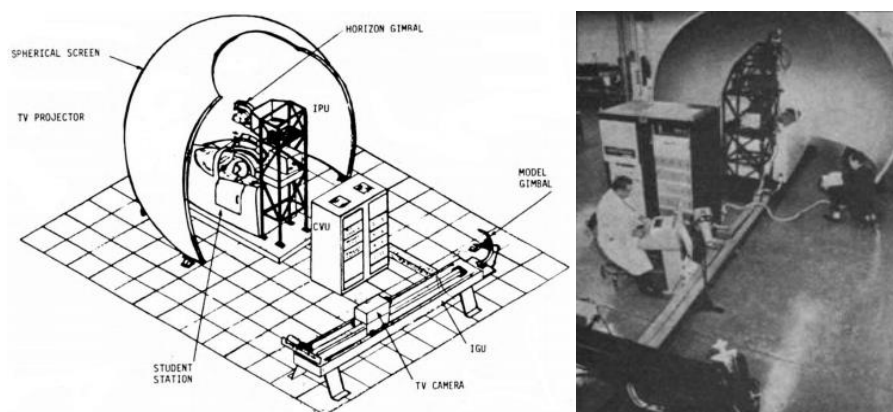


Figura 2-1. *Formation Flight Trainer (FFT)* (WOOD, HAGIN, *et al.*, 1972).

O experimento realizado utilizou 70 pilotos estudantes distribuídos em 3 grupos. O primeiro grupo foi treinado em 5 rodadas do simulador FFT do T-38, o segundo foi treinado em duas seções na aeronave T-38 real e um último não foi sujeito a nenhum treinamento (grupo de controle). Na sequência das rodadas de treinamento, os pilotos dos 3 grupos executaram um voo real onde foram avaliados por instrutores de voo, recebendo notas de 0 a 12 de acordo com a independência e proficiência do aluno na execução de 9 manobras de formação.

A análise estatística das notas obtidas apontou uma diferença significativa entre as notas dos pilotos treinados e aquela dos pilotos não treinados (grupo de controle), comprovando uma transferência de treinamento positiva tanto no voo real quanto para a simulação. Apesar da média dos pilotos treinados em voo real ser superior à média dos pilotos treinados em simulador, a diferença não foi considerada estatisticamente significativa.

Como contribuição, a pesquisa realizada por Reid evidencia o potencial do treinamento de pilotos novatos em simuladores de voo, para o caso de voo em formação. No entanto, observa-se que Reid não defende a substituição total do treinamento em voo por treinamento em simulador. Neste sentido, o trabalho de Reid deixa algumas lacunas ainda a serem exploradas. Entre elas, destacam-se a investigação dos limites do treinamento no simulador como substituto do voo real e a correlação entre o resultado obtido e a experiência do piloto. Outro ponto a ser investigado é a identificação de diferenças entre treinamento em simulador e voo real por meio da comparação de medidas objetivas de desempenho na execução da tarefa, avaliações de carga de trabalho e medidas psicofisiológicas dos pilotos.

Roessingh em 2005, avalia a transferência para o voo real da habilidade de pilotagem adquirida em treinamento num ambiente de baixa fidelidade. A hipótese colocada pelo autor é que “*a habilidade de pilotagem manual complexa, aprendida em solo, se transfere para a aeronave em voo real*” (ROESSINGH, 2005). O pesquisador seleciona como escopo da análise o caso de voos acrobáticos, durante os quais o piloto é submetido a atitudes e forças pouco usuais.

O experimento realizado envolveu 21 pilotos estudantes com menos de 250 horas de voo e sem nenhuma experiência em voos acrobáticos. Durante 10 dias, os indivíduos selecionados realizaram treino de acrobacias de 30 minutos com o auxílio de um instrutor em uma aeronave *Bellanca Super Decathlon*.

Os pilotos foram separados em 3 grupos de 7. O grupo de controle C recebeu apenas o treinamento em voo real. Já os pilotos dos grupos S e X receberam 50 minutos de treinamento em simulador, antes de cada treinamento em voo real. Para ambos os grupos S e X, o simulador

utilizado era de base fixa e equipado com o *software* de simulação *Flight Unlimited* da *Looking Glass Technologies*, configurado com o modelo aerodinâmico do *Bellanca Super Decathlon*.

Os simuladores utilizados pelos grupos S e X possuíam diferentes graus de fidelidade. No caso do grupo S, a simulação foi executada em ambiente de simulação de baixa fidelidade, composto por um computador equipado com *sidestick*, manete de potência e pedais comerciais. Por outro lado, o grupo X recebeu treinamento em um simulador de alta fidelidade, composto por equipamentos representativos da aeronave real e *inceptors* com controle de força ajustados para a aeronave real.

Os voos realizados pelos 21 pilotos foram analisados de duas formas:

- Cálculo do desempenho do piloto, utilizando critérios objetivos pré-definidos com base nos dados de altitude, velocidade, aceleração, ângulos de *pitch*, *roll* e *heading*;
- Notas atribuídas por instrutores durante os voos, direcionadas pelos mesmos critérios adotados no cálculo do desempenho.

Os resultados obtidos a partir do cálculo de desempenho não apontaram influência significativa das rodadas de simulação dos grupos S e X em comparação com o grupo de controle C, conforme ilustrado na Figura 2-2, enfraquecendo a hipótese proposta. Além disso, ao analisar as notas atribuídas pelos instrutores, o autor identificou que estes influenciavam a pontuação atribuída. Ao isolar esta influência, os resultados se tornaram similares aos obtidos no cálculo de desempenho. Por fim, o experimento verificou a influência da habilidade do piloto e da quantidade de aulas recebidas no desempenho calculado e nas notas atribuídas pelos instrutores.

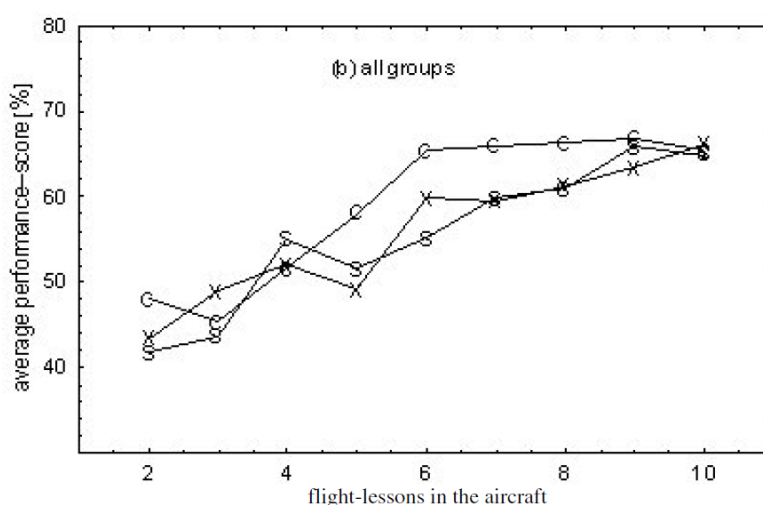


Figura 2-2. Desempenho calculado dos pilotos ao longo do treinamento.

O trabalho de Roessingh confirma a importância do voo real no treinamento, para o caso de voos acrobáticos. Ao contrário do trabalho de Reid, não foi identificada nenhuma contribuição resultante do treinamento em simulador.

Entre as lacunas deixadas pelo trabalho de Roessingh, destaca-se a investigação da melhor forma de combinar o treinamento no simulador com o treinamento no voo real. Observa-se que o resultado obtido por Roessingh pode ter sido influenciado pelo fato do treinamento no simulador ter sido intercalado com o treinamento em voo, ao invés do treinamento em voo ser colocado como uma evolução do treinamento no simulador. Destaca-se também a necessidade de uma análise mais aprofundada das diferenças entre voo simulado e voo real, considerando por exemplo o uso de medidas psicofisiológicas.

Em relação ao trabalho proposto nesta tese, observa-se que ambos os trabalhos de Reid e Roessingh limitam-se a analisar o treinamento em voo simulado e voo real. A possibilidade de voo real com elementos virtuais não é considerada em nenhum dos trabalhos.

2.2 Comparações psicofisiológicas entre voos simulados e voos reais

Esta seção discute trabalhos que buscam identificar semelhanças e diferenças entre voo simulado e voo real, por meio da coleta de dados psicofisiológicos. A revisão destes trabalhos tem como objetivo suportar a hipótese de que, na perspectiva do piloto, existe diferença entre voo real e voo simulado.

Leino (1999) compara as reações endócrinas resultantes de voos com o simulador de treinamento da aeronave *BA Hawk Mk 51* e voos reais desta mesma aeronave. Neste estudo são utilizados 5 pilotos experientes e 5 pilotos novatos da força aérea finlandesa.

O protocolo de testes envolvia a execução, uma vez em simulador e uma vez em voo real, de 4 manobras: decolagem, aproximação por ILS, aproximação visual e pouso. Amostras de sangue foram coletadas 30 minutos antes e 10 minutos após os voos e testadas para os diversos hormônios (hormônio liberador de corticotrofina (CRH), corticotrofina, beta endorfina, prolactina, noradrenalina, adrenalina, cortisol, peptídeo natriurético atrial (ANP) e arginina vasopressina (AVP).

Os hormônios prolactina e ANP apresentaram variações significativas na comparação entre voo real e simulado, sugerindo um aumento do *stress* associado ao voo real e apontando diferenciações endocrinológicas significativas. Os resultados obtidos sustentam a hipótese que o voo simulado não apresenta a mesma carga de trabalho que o voo real.

Observa-se que, de acordo com Leino, as manobras realizadas possuem níveis baixos de aceleração, deixando para trabalhos futuros a investigação de manobras com altos valores de aceleração. Além disso, a pesquisa realizada por Leino monitorou apenas o batimento cardíaco. Outros parâmetros psicofisiológicos e de desempenho não foram considerados neste estudo.

Veltman (2002), realizou um estudo para obter informações sobre a sensibilidade de vários indicadores psicofisiológicos a esforços mentais com o intuito de explorar estas medidas no voo real e consequentemente, obter dados psicofisiológicos comparativos de voos com simuladores e aeronaves reais.

Para este estudo foram utilizados 20 pilotos da força aérea holandesa. Os pilotos realizaram 6 tarefas de voo em um simulador de voo *Frasca 141*, onde apenas instrumentos eram apresentados para o piloto, sem exibição de visual externo à aeronave. Nesta situação, solicitou-se aos pilotos que realizassem 6 tarefas com objetivo de aumentar a carga de trabalho. Solicitou-se também aos pilotos que realizassem as mesmas 6 tarefas em um voo real com uma aeronave *Slingsby*. Neste caso, porém, o instrutor retomava o controle da aeronave após um determinado tempo de voo, para realizar 5 minutos de voos acrobáticos cujas acelerações alcançavam cerca de 4 G. Após este período, o piloto retomava o voo e continuava a execução das tarefas. Foram coletadas medidas de *heart rate*, *heart rate variability*, respiração, duração, frequência e amplitude de piscadas e nível de cortisol.

Dentre as alterações significativas encontradas, destaca-se uma elevação no nível do hormônio cortisol (associado ao nível de *stress*) após o voo real, ao contrário do voo simulado, que apresentou uma diminuição do hormônio em relação ao *baseline* coletado.

A introdução das acrobacias no voo real, apesar de enfraquecer a comparação entre voo real e voo simulado, evidencia uma reação psicofisiológica interessante que pode estar associada às grandes acelerações apresentadas no voo real.

Entre as limitações do estudo realizado por Veltman, destaca-se a baixa fidelidade do simulador utilizado em relação ao ambiente de voo real. Em particular, a ausência de sistema visual pode ter influência nas medidas referentes à frequência de piscadas e às movimentações verticais executadas pelas pupilas. Além disso, não são consideradas, entre as medidas coletadas, medidas de desempenho na execução da tarefa.

Em um trabalho mais recente Johannes (2017), propõem uma métrica, denominada *PAV* (*Psychophysiological Arousal Value*), que combina diferentes medidas psicofisiológicas em um único índice, com objetivo de investigar as diferenças entre o voo real e o voo simulado.

Neste trabalho 15 pilotos, todos com mais de 2000 horas de voo, foram selecionados e classificados de acordo com sua experiência na manobra de REVO (reabastecimento em voo), foco do experimento. Cinco pilotos sem experiência em REVO foram considerados novatos, os outros 10 foram considerados experientes.

O experimento foi composto por um REVO (Reabastecimento em Voo) dividido em 22 fases organizadas nas seguintes classes: voo normal, aproximação normal, REVO 50 ft, contato, precisão final e pouso. A tarefa realizada foi similar para voo real e simulação. Foram coletadas as seguintes medidas psicofisiológicas do piloto: ECG (Eletrocardiograma), GSR (Resposta Galvânica da Pele) e temperatura. Os resultados foram compilados de acordo com a métrica *PAV* proposta pelos autores.

Como resultado, verificou-se uma diferença estatisticamente significativa entre REVO simulado e REVO real no grupo de novatos. No entanto não foi observada diferença no grupo de pilotos experientes, indicando que a alteração fisiológica associada à comparação entre voo real e voo simulado pode estar associada não a falta de experiência genérica do piloto, mas sim a falta de experiência na atividade específica em execução.

Observa-se ainda que, neste estudo, os dados fisiológicos coletados foram utilizados para o cálculo de uma medida única, o *PAV*. Entretanto, o autor disponibiliza a análise dos dados originais de forma individual em um apêndice separado. Estas análises indicam que, separadamente, os dados obtidos não apresentam diferença significativa entre simulação e voo real. Além disso, alterações em medidas como *HPD* (*Heart Period Duration*) e *SCL* (*Skin Conductance Level*) são associadas à experiência do piloto.

Observa-se que o trabalho de Johannes *et al* se limita ao escopo principal da manobra de REVO, deixando para trabalhos futuros a investigação de outras manobras. Além disso, as medidas realizadas não levam em consideração parâmetros de desempenho na execução das tarefas.

De forma complementar a estes trabalhos, estudos de McClernon (2009) e (2011) analisaram a influência de estressores no treinamento de pilotos. O primeiro trabalho, de 2009, foi realizado em simulador de voo, evoluindo em 2011 para um estudo baseado em voos reais.

Em 2009, McClernon realizou um experimento comparativo utilizando 29 pilotos novatos. Os participantes foram divididos em 2 grupos: um grupo de controle e um grupo experimental. No experimento, os grupos foram submetidos a um treinamento simplificado de voo com um instrutor experiente, composto por procedimentos de subida, voo nivelado, curvas e descida. O grupo experimental, em determinado momento do treinamento, foi exposto a um estressor que consistia em submergir um dos pés do participante em água a 9°C por um período

de 10 a 15 minutos. Após este período, os pilotos retornavam ao treino da tarefa. Por fim, foram realizados voos de avaliação, com os dois grupos, sob efeito do estressor.

O treinamento foi realizado em um simulador de voo de baixa fidelidade, baseado em computador com *software* de simulação X-Plane 8.0, modelo aerodinâmico da aeronave *Cessna 172* e sem a presença de visual externo. O computador foi equipado com *inceptors* comerciais simplificados.

Neste estudo, foram coletados dados de: ECG, GSR, desempenho e avaliações subjetivas de *stress*. O treinamento com *stress* obteve resultados positivos na análise do ECG, dados de desempenho e questionários subjetivos. Na análise GSR não foram evidenciadas diferenças significativas entre os dois grupos.

Os resultados do experimento comprovam uma influência significativa das condições de treino na transferência de treinamento do piloto. O grupo exposto aos estressores durante o treinamento teve melhor desempenho do que o grupo que teve que lidar pela primeira vez com as sensações associadas aos estressores durante o voo de avaliação.

Em 2010, os autores realizaram um novo experimento, onde o treinamento manteve a configuração do experimento anterior, mas neste caso a transferência de treinamento foi aferida por meio de medidas de desempenho e análises subjetivas realizadas em voo real.

Novamente o resultado indicou uma transferência de treinamento maior para o grupo sujeito a treinamento sob o efeito de estressores. Estes resultados, apesar de não representarem uma comparação direta entre voo simulado e voo real, sugerem a relevância do ambiente e das técnicas de treinamento utilizadas na transferência de treinamento obtida.

2.3 Treinamento embarcado e simulação virtual em ambiente real de voo

Esta seção apresenta trabalhos que propõem o treinamento em voo por meio da adição de elementos virtuais. Estes trabalhos foram desenvolvidos, em sua maioria, no *National Aerospace Laboratory (NLR)*.

Em 2003, Roessingh *et al.*, desenvolveram um estudo para identificar os requisitos necessários para um sistema embarcado de treinamento de combate. Este sistema de treinamento, identificado pela sigla *ETS (Embedded Training System)*, foi definido da seguinte forma:

Embedded Training (ET) é uma forma de treinar um piloto, na qual ameaças simuladas são apresentadas, durante o voo, através de vários sistemas aviônicos de uma aeronave de combate. Isto permite treinar contra forças virtuais ou forças

reais virtualmente aumentadas, com um debriefing de missão e capacidades de playback em solo. O ET permite que o operador utilize o sistema de armas em situações para a qual este foi projetado, mesmo que esta situação real não esteja presente no dia a dia. Isso permite treinar pilotos de combate de forma mais efetiva, utilizando uma aeronave real em um voo real em combinação com um mundo simulado construído ao redor. (ROESSINGH, VAN SIJLL e JOHNSON, 2003)

O trabalho considerou as principais características de uma missão de combate aéreo, tanto para o caso de combate dentro do limite visual (*Within Visual Range, WVR*) quanto para o caso fora do limite visual (*Beyond Visual Range, BVR*). Como resultado, constatou-se que os sistemas *HMD (Helmet Mounted Display)* da época não apresentavam maturidade suficiente para acomodar o sistema embarcado de treinamento, que exigia sobreposição de elementos virtuais ao mundo real, tais como aeronaves, armas, dentre outros.

Umas das contribuições deste trabalho foi a especificação de uma arquitetura para o sistema embarcado de treinamento, que foi posteriormente utilizada no desenvolvimento do sistema *E-CATS*, apresentado em (WEDZINGA, 2005) e (KRIJN e WEDZINGA, 2004). O *E-CATS* é um sistema de treinamento embarcado com capacidade de simular situações de combate fora do campo visual, ar/ar e ar/terra, utilizando a arquitetura de (ROESSINGH, VAN SIJLL e JOHNSON, 2003)

Para testar a aceitação e a efetividade do equipamento na integração com o caça F-16, os autores executaram um experimento de demonstração envolvendo 4 cenários diferentes de voo: detecção de mísseis terra/ar virtuais, detecção de uma aeronave hostil virtual, detecção de duas aeronaves hostis virtuais e um cenário combinado. Um total de 8 missões foram executadas, com duração de uma hora cada. Participaram de cada voo um piloto da força aérea holandesa e um piloto convidado. No início de cada missão, o piloto da força aérea holandesa apresentava os 4 cenários e, em seguida, o piloto convidado executava uma combinação dos cenários que julgasse interessante. Após a missão, os pilotos convidados julgavam o realismo da aplicação e classificavam a sua efetividade em relação ao treinamento real e à simulação em solo.

No geral, o *E-CATS* recebeu avaliações em média superiores aos treinamentos em solo e em situações reais. Como limitação do estudo realizado, destaca-se a avaliação subjetiva baseada em observações e opiniões dos pilotos convidados. Não foram investigados os benefícios e limites do uso da tecnologia para o treinamento. Outra limitação é que o sistema *E-CATS* não aborda situações de combate visual, que foram deixadas para trabalhos futuros.

Ainda dentro do projeto *E-CATS*, (LEMMERS, 2008) e (ROESSINGH e VERHAAF, 2009) apresentam um aprimoramento do sistema de treinamento embarcado, incluindo a capacidade de voo *multi-ship*. O sistema é melhorado para permitir situações de duas ou mais aeronaves em combate fora do alcance visual. Como nos trabalhos anteriores, a aplicação é analisada de forma subjetiva em uma demonstração de voo de combate realizada com os *stakeholders* do projeto. Permanece, portanto, a lacuna de uma avaliação sistemática que identifique benefícios e limites da tecnologia proposta.

Em trabalhos mais recentes, (MAGEE, SOTTILARE e ROESSINGH, 2011), (ALEXANDER, SOTTILARE, *et al.*, 2012) e (TASK GROUP HFM-165, 2014) apresentam potenciais desdobramentos dos trabalhos desenvolvidos pelo *NLR*, com base nas discussões realizadas no âmbito de um grupo de pesquisa da OTAN (Organização do Tratado do Atlântico Norte). Aborda-se não apenas o treinamento embarcado, tal como proposto pelo *NLR*, mas também o uso de sistemas virtuais embarcados, identificados pela sigla em inglês *EVS* (*Embedded Virtual Systems*). Destaca-se como conclusão destes trabalhos o potencial dos sistemas de treinamento embarcado e dos sistemas virtuais embarcados. Além disso, são expostos alguns desafios tecnológicos para a adequação dos sistemas de treinamento embarcado para combate visual.

Os desafios tecnológicos apontados pelos trabalhos desenvolvidos no *NLR* têm sido explorados por diversas empresas. Entre elas, destaca-se a *Elbit Systems*, uma empresa que atua no ramo de aeronáutica de defesa desde 1996, e a *RED6*, uma *startup* criada no fim de 2018 voltada para o emprego de realidade aumentada no treinamento de combate.

A *RED6* propõe um sistema de realidade aumentada denominado *A-TARS* (*Airborne Tactical Augmented Reality System*), integrado a um *helmet mounted display*, com capacidade de gerar hologramas de elementos externos na execução de um voo de combate, conforme ilustrado na Figura 2-3.

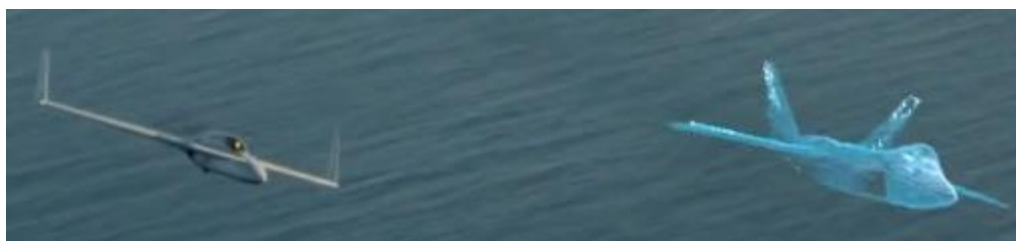


Figura 2-3. Aeronaves real e projetada no sistema *A-TARS* (RED6, 2019).

A solução proposta pela *RED6* (ROBINSON e BICANIC, 2019) é voltada para o treinamento de voo em combate e tem grande embasamento nas aplicações da *NLR* e do *E-*

CATS. Entretanto, a empresa não apresenta estudos comparativos referentes ao treinamento utilizando o sistema *A-TARS* e métodos convencionais de treinamento. Permanece, portanto, a lacuna referente a identificação dos benefícios e limitações da solução apresentada. Observa-se, também, que não foram apresentadas aplicações da tecnologia proposta em ambiente real.

2.4 Considerações finais do capítulo

Ambos os trabalhos discutidos na Seção 2.1 identificam de forma clara a contribuição do treinamento em voo real para melhora do desempenho em voo. No que se refere à contribuição do treinamento em ambiente simulado, os resultados obtidos são divergentes. A partir da análise combinada de ambos os trabalhos, concluiu-se que a contribuição do treinamento em simulador depende de diversos fatores, entre os quais sugerem-se: a manobra em treinamento, o ambiente de simulação utilizado, os parâmetros e variáveis utilizados como métrica na comparação e a forma como o treinamento em simulador é combinado com treinamento em voo real. Como conclusão, identifica-se uma lacuna no que se refere à análise sistemática dos benefícios e limitações do treinamento em voos reais e simulados.

A revisão apresentada na Seção 2.2 aponta diversas diferenças nas reações psicofisiológicas e endocrinológicas do piloto em voo real e voo simulado, indicando um maior *stress* e carga de trabalho no voo real, além disso, percebe-se uma influência significativa da situação e do ambiente de treinamento no resultado da capacitação de pilotos. Como lacuna, observa-se que em nenhum dos trabalhos apresentados, as medidas psicofisiológicas são relacionadas às medidas de desempenho na execução das tarefas propostas. Além disso, os resultados obtidos são limitados ao tipo de manobra analisada e ambiente de simulação utilizado. Apesar destas limitações, a revisão apresentada motiva a proposta desta tese, que investiga uma variação do treinamento em voo.

Os trabalhos discutidos na Seção 2.3 se referem à proposta do uso de sistemas de realidade aumentada no treinamento de combate aéreo. As soluções propostas sobrepõem tarefas virtuais ao ambiente real de voo, simulando um combate. Entre as limitações dos sistemas apresentados na literatura destaca-se o foco em situações de combate fora do limite visual (*Beyond Visual Range, BVR*). A adequação das soluções propostas para combate visual (*Within Visual Range, WVR*) é apontada como um desafio tecnológico nas pesquisas desenvolvidas no *NLR*. Observa-se que este desafio tem sido analisado por empresas do setor,

entre as quais destaca-se a *RED6*, que patenteou uma solução para visualização de elementos 3D virtuais, dentro do campo de visão do piloto durante um voo real.

Comparando as propostas do *NLR* e da *RED6* com a presente tese, aponta-se como principal lacuna a ausência de trabalhos que investiguem, de forma científica, sistemática e objetiva, os benefícios e limites do treinamento em voo real com elementos virtuais. Outra diferença é a aplicação almejada, que no caso desta tese, trata do voo em formação. Finalmente, salienta-se que estes trabalhos são um importante indicador de que eventuais barreiras tecnológicas relacionadas a viabilidade do produto serão superadas num futuro próximo.

3 Fatores Humanos na Aviação

Para entender o impacto sobre o piloto do uso de realidade aumentada em voo, é necessário compreender como os elementos de interface disponibilizados no *cockpit* influenciam o comportamento do ser humano e a tomada de decisão.

Neste sentido, este capítulo inicia-se com a apresentação e discussão dos dois principais modelos relacionados ao comportamento humano utilizados no setor aeronáutico, propostos por Endsley, 1995 e Rasmussen, 1983. Em seguida apresenta-se uma revisão de métodos utilizados para análise de fatores humanos, como carga de trabalho e *stress*.

3.1 Modelos do comportamento humano

Em geral, qualquer tipo de máquina ou processo precisa informar ao ser humano seu estado, seus problemas e suas funcionalidades disponíveis, de tal forma que o operador possa identificar, processar e planejar suas ações de forma rápida e assertiva (RASMUSSEN, 1983) (RASMUSSEN, PEJTERSEN e GOODSTEIN, 1994). A pilotagem de aeronaves se enquadra nesta categoria. As informações disponibilizadas no cockpit afetam não apenas o desempenho do piloto, mas também têm uma grande contribuição para a segurança do voo.

Muitos acidentes que têm entre suas causas o fator humano são, na verdade, fruto de formulação errônea de modelos mentais para tomadas de decisão. Estes acidentes não se devem somente às limitações físicas e cognitivas humanas, mas principalmente a interfaces inadequadas, que não fornecem, ou fornecem de forma equivocada ou pouco eficiente, os dados que o piloto precisa para voar e gerenciar o voo (SARTER e AMALBERTI, 2000) (WOODS e HOLLNAGEL, 2006) *apud*. (HENRIQSON, JÚNIOR, *et al.*, 2009).

Entre os principais modelos propostos na literatura para explicar a relação entre o comportamento humano e a interface homem-máquina, destacam-se os de Rasmussen (RASMUSSEN, 1983) e de Endsley (ENDSLEY, 1995) apresentados a seguir.

3.1.1 *Modelo proposto por Rasmussen*

De acordo com o modelo comportamental proposto por Rasmussen, (1993) e Rasmussen, Pejtersen, & Goodstein, (1994), o ser humano possui três níveis de atuação, conforme representado na Figura 3-1:

- *Skill based behaviour*: é um comportamento automático, executado sem o uso direto de consciência. A tomada de decisão é direta e baseada nas observações já costumeiras e muito bem treinadas e decoradas à mecanização. O operador neste nível, pode não perceber, nem se atentar a execução da tarefa em questão.
- *Rule based behaviour*: esta classe comportamental apresenta uma característica maior de consciência nas ações que são baseadas em regras memorizadas, gravadas, provenientes de treinamento, testes ou tentativas e erros. Este comportamento pode evoluir para um *skill based behaviour* por meio de treinamento e prática.
- *Knowledge based behaviour*: este é o comportamento com forma mais consciente e menos automatizada entre os três. Neste caso, o ser humano necessita abstrair e raciocinar perante informações e padrões com algum grau de desconhecimento. Neste caso, o tempo de tomada de decisão é elevado, para que o modelo mental a ser utilizado seja mais assertivo.

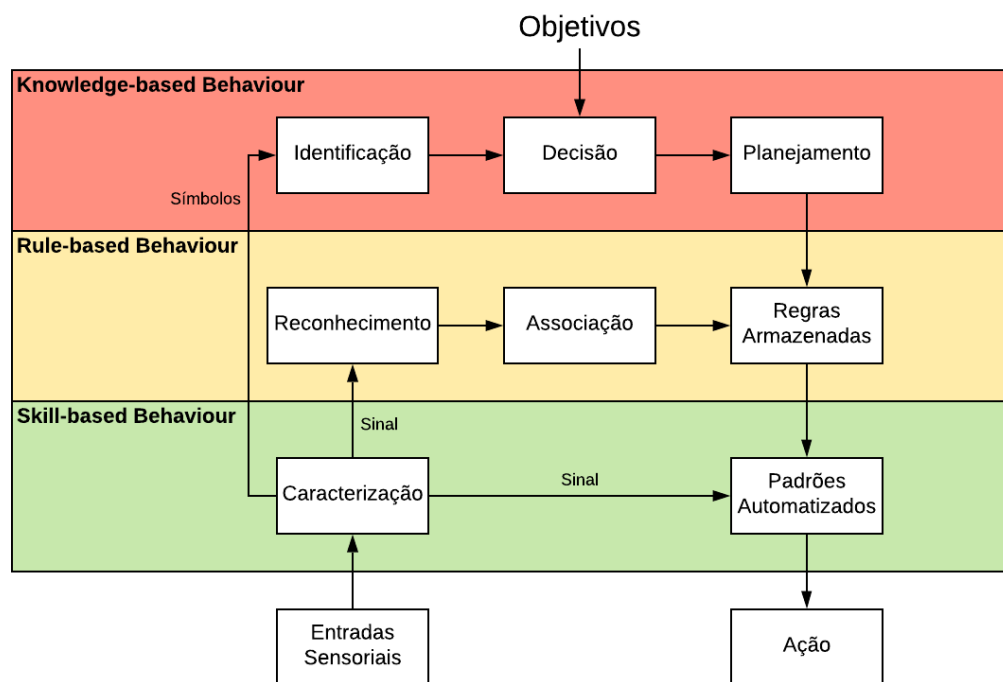


Figura 3-1. Modelo proposto por Rasmussen. Adaptado de (RASMUSSEN, 1983).

Observa-se que tarefas executadas de forma corriqueira e treinadas frequentemente tendem a requerer um tempo de percepção e tomada de decisão menor do que tarefas raramente praticadas. Além disso, pode-se inferir do modelo apresentado que uma tarefa, mesmo que automatizada, necessita de informações em tempo real para que possa ser corretamente executada. Erros ou faltas nas entradas sensoriais fornecidas ao indivíduo podem provocar

ações e tomadas de decisão equivocadas, uma vez que os modelos mentais podem ser erroneamente construídos ou reconhecidos.

3.1.2 *Modelo proposto por Endsley*

A partir de meados dos anos 90, Endsley publicou uma série de trabalhos (ENDSLEY, 1990) (ENDSLEY, 1995), (ENDSLEY, 1995), (ENDSLEY, FARLEY, *et al.*, 1998), (ENDSLEY e SMOLENSKY, 1998) e (ENDSLEY, 2011) cujo tema central era a caracterização dos elementos que influenciam o comportamento humano e tomada de decisão.

Em seu trabalho, a pesquisadora formula a seguinte definição para o conceito de consciência situacional:

Consciência situacional é a percepção dos elementos ambientais contidos em um volume espacial e temporal, a compreensão de seus significados e a projeção de seus estados em um futuro próximo (ENDSLEY, 1995).

Expande-se a seguir os conceitos de alguns termos presentes nesta definição (ENDSLEY, 1995):

- Elementos: são entidades físicas expostas ao operador e são específicas para cada tipo diferente de tarefa;
- Tempo: não necessariamente se refere a linha contínua e ao evento imediato, ao contrário, depende da dinâmica do sistema a ser estudado, podendo ter diversas características de frequência e ser inclusive, construído com o passar da continuidade da tarefa.
- Espaço: pode ser entendido como o ambiente que engloba e pode influenciar todas as informações necessárias ou disponíveis à operação. Como exemplo, pode-se verificar que um piloto de caça que mantém atenção no posicionamento de seu inimigo pode estar mais suscetível a falhas decorrentes da geografia e topologia, uma vez que estas informações estão disponíveis, mas não são consumidas pelo piloto.

A definição de consciência situacional proposta por Endsley foi sedimentada e extrapolada no modelo apresentado Figura 3-2, que relaciona de forma resumida os diversos itens que afetam a consciência situacional, a tomada de decisão e a posterior ação.

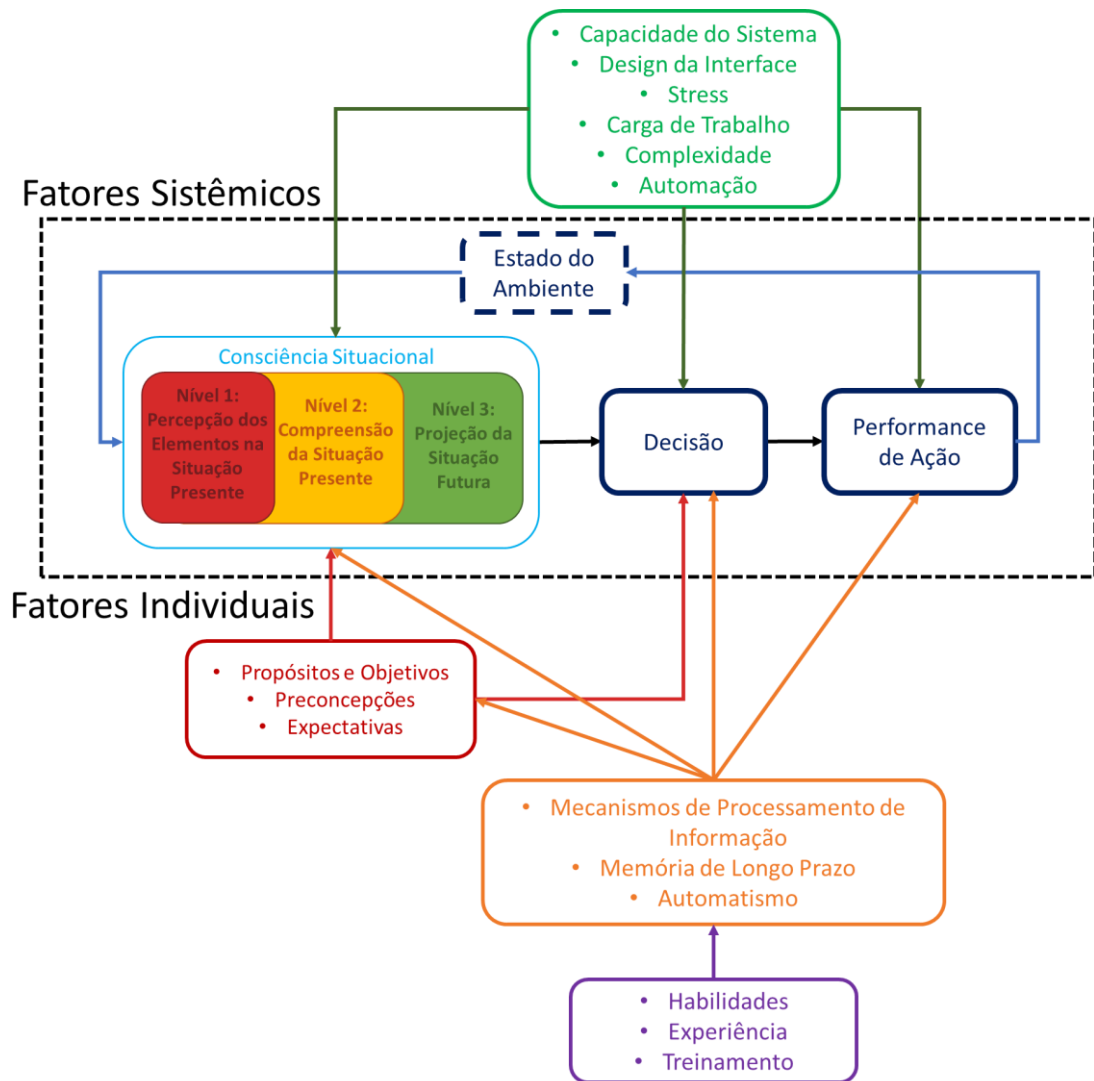


Figura 3-2. Modelo proposto por Endsley. Adaptado de (ENDSLEY, 1995).

O diagrama da Figura 3-2 organiza consciência situacional em três níveis diferentes:

- Nível 1 – Percepção: neste estágio, o operador visualiza e simplesmente toma consciência da existência dos elementos, porém, nenhum processamento é realizado a partir disso.
- Nível 2 - Compreensão: partindo da consciência de percepção do elemento, o operador processa e compreende o significado de sua percepção.
- Nível 3 – Projeção: o operador, dotado de compreensão da situação, planeja as próximas ações a serem tomadas.

No modelo proposto por Endsley, a consciência situacional atua, de forma direta, na tomada de decisão e, de forma indireta, no desempenho do operador. Além disso, a tomada de decisão ainda sofre intervenções diretas de impressões pessoais (objetivos), modelos mentais e fatores ambientais.

A partir da análise dos modelos apresentados, observa-se a influência do treinamento e da interface homem-máquina na formação da consciência situacional, na tomada de decisão e no desempenho do ser humano. O treinamento permite que o piloto seja capaz de executar diferentes atividades de forma regrada ou até mesmo automatizada. No entanto, o reconhecimento de padrões, a aplicação de modelos mentais ou a caracterização de situações automatizadas depende de como as informações sobre o estado do sistema são disponibilizadas para o piloto, ou seja, da interface projetada.

No caso da presente tese, estes modelos são importantes para compreender como o sistema de realidade aumentada afeta o piloto e quais os fatores a serem considerados no planejamento de experimentos de avaliação da interface proposta.

3.2 Métodos de avaliação de fatores humanos

Tradicionalmente, os métodos para avaliação de fatores humanos como carga de trabalho, *stress*, atenção e fadiga são organizados em duas classes principais. A primeira é composta por técnicas de avaliação subjetiva, como questionários e escalas de avaliação. Ela reflete a percepção consciente individual da situação. Sua principal vantagem é a simplicidade de aplicação. Por outro lado, as desvantagens incluem a subjetividade inerente das medições e a dependência da memória.

A segunda classe de métodos é baseada em medidas objetivas e pode ser organizada em duas subclasses:

- Métodos baseados em medidas de performance: pressupõem que alterações de fatores como carga de trabalho, *stress*, e outros resultam numa degradação do desempenho. No entanto, a relação entre performance e o fator em análise nem sempre é linear, o que dificulta a análise (MARINESCU, SHARPLES, *et al.*, 2018). Na verdade, alguns estudos observaram que níveis baixos e altos de carga de trabalho mental influenciam negativamente o desempenho (MARINESCU, SHARPLES, *et al.*, 2018).
- Métodos baseados em medidas neurofisiológicas: consideram que os fatores humanos estão relacionados a atividade do sistema nervoso autônomo. O sistema nervoso autônomo controla tanto a resposta simpática, que aumenta o estado de alerta e prepara o corpo para uma situação de emergência, quanto a resposta parassimpática, que está relacionada aos estados de repouso e digestão do corpo. O sistema nervoso autônomo, quando afetado, altera as propriedades do corpo humano, como frequência cardíaca e respiratória, temperatura

corporal, condutividade da pele e tamanho da pupila. Os métodos nesta categoria pressupõem que os dados fisiológicos refletem a percepção individual da situação.

A seguir discutem-se alguns métodos e métricas para as classes e subclasses mencionadas.

3.2.1 Métricas de performance

Paas & Van Merriënboer (1993) definem desempenho como “a eficácia na realização de uma tarefa particular”. Como consequência, as medições de desempenho dependem da natureza da tarefa que está sendo executada. Pode ser definido como o tempo para realizar uma tarefa, o erro quadrático médio calculado sobre um caminho de referência, número de alvos atingidos em um intervalo de tempo, métricas derivadas de entradas de controle do piloto ou trajetória de voo da aeronave, entre muitos outros. Em um cenário multiobjetivo, um índice de performance pode ser definido como a combinação ponderada e normalizada de várias medidas, conforme proposto em Yu *et al.* (2020).

3.2.2 Escalas Subjetivas

Entre os métodos de avaliação subjetiva mais usados, está o *NASA Task Load Index* (*NASA TLX*) (HART e STAVELAND, 1988). O *NASA-TLX* é uma escala de classificação multidimensional que combina seis fatores para obter uma estimativa da carga de trabalho (HART e STAVELAND, 1988). Cada fator é avaliado em uma escala de Likert com 21 níveis, conforme ilustrado na Figura 3-3. Os seis fatores que compõem o *NASA-TLX* são:

- Demanda Mental: está relacionada a atividade mental necessária para o operador realizar a tarefa. Pode-se traduzir como a dificuldade de, por exemplo, calcular, procurar ou decidir sobre algo.
- Demanda Física: está relacionada a atividade física necessária para o operador realizar a tarefa, levando em consideração se a operação exige força, agilidade, velocidade, ou causa algum tipo de cansaço físico.
- Demanda Temporal: está relacionada a pressão temporal imposta por uma determinada tarefa, ou a frequência de ocorrências da tarefa num intervalo de tempo.
- Performance: reflete a percepção do operador sobre seu desempenho na execução de determinada tarefa. Relaciona-se com o grau de satisfação do operador com seu trabalho.

- Esforço: apesar de aparentar ser uma mistura de demanda física com demanda mental, o esforço reflete a percepção da dificuldade da tarefa pelo operador.
- Frustração: avalia sentimentos do operador como insegurança, irritação, relaxamento, entre outros e reflete a percepção do operador de seu estado emocional.

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
------	------	------

Mental Demand How mentally demanding was the task?

Very Low
Very High

Physical Demand How physically demanding was the task?

Very Low
Very High

Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?

Very Low
Very High

Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

Perfect
Failure

Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

Very Low
Very High

Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

Very Low
Very High

Figura 3-3. NASA TLX.

A principal premissa da NASA-TLX é que a combinação dessas 6 dimensões representa a carga de trabalho experimentada por um ser humano ao realizar uma tarefa. Embora tenha sido proposto há mais de 30 anos, ainda é um método muito popular, aplicado em muitas áreas e frequentemente usado como referência para avaliar outros métodos. Em 2006, Sandra Hart, uma das autoras do NASA-TLX, publicou uma revisão sobre 550 artigos que usam NASA-TLX, incluindo aplicações do governo, indústria e universidades, de diversos países. Muitos dos trabalhos revisados investigam a correlação entre NASA-TLX e outros fatores humanos, como

fadiga, estresse, confiança e consciência da situação. É interessante observar que, embora seja esperada uma correlação entre *NASA-TLX* e a consciência situacional, diferentes estudos encontraram correlação positiva, negativa e nenhuma correlação.

Além do *NASA-TLX*, outras escalas subjetivas normalmente utilizadas principalmente para a avaliação da carga de trabalho associada ao manuseio de aeronaves, são a *Cooper-Harper Handling Quality Rating (HQR)* (COOPER e HARPER, 1969) e a escala de Bedford (GAWRON, 2008), ambas são escalas unidimensionais, organizadas em 10 níveis.

3.2.3 Medidas fisiológicas

O uso de medidas fisiológicas para estimar fatores como carga de trabalho mental, estresse, atenção e outros não é novo. No início do século passado, Gemelli, (1917) apresentou um dos primeiros trabalhos sobre o uso de medidas fisiológicas (pressão arterial, respiração e pulsação) para estimar o estresse do piloto durante o voo (ROSCOE, 1992). Ao longo das décadas, muitos trabalhos têm sido dedicados a entender como os sinais neurofisiológicos humanos são afetados pela carga de trabalho mental e outros fatores humanos, como consciência da situação, *stress*, fadiga e sonolência. Embora um grande número de trabalhos tenha sido publicado na literatura, os resultados variam caso a caso.

A seguir, introduzem-se sensores utilizados e os conceitos básicos relacionados a duas medidas fisiológicas comuns na literatura aeronáutica e de fácil coleta: eletrocardiograma e resposta galvânica da pele.

Eletrocardiograma - ECG

O eletrocardiograma corresponde a medida dos sinais elétricos enviados ao coração para a execução da contração e relaxamento das células musculares que o formam, caracterizando a sístole e a diástole (MACFARLANE, VAN OOSTEROM, *et al.*, 2011).

Uma onda captada por um eletrocardiograma possui uma característica periódica bem conhecida: o complexo PQRS, ilustrado na Figura 3-4. A análise de determinados padrões ou quebra de padrões que ocorrem neste formato de onda pode caracterizar desde *stress* até doenças cardíacas (MACFARLANE, VAN OOSTEROM, *et al.*, 2011).

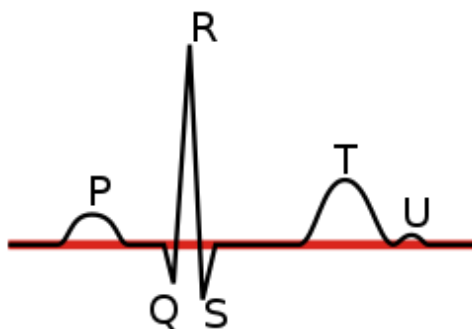


Figura 3-4. Onda PQRST.

Diversas variáveis podem ser calculadas a partir dos sinais coletados pelo ECG, seja no domínio do tempo seja no domínio da frequência (MANSIKKA, VIRTANEN, *et al.*, 2016), (HIDALGO-MUÑOZ, MOURATILLE, *et al.*, 2018). Dentre as variáveis propostas na literatura, destacam-se as seguintes (SHAFFER e GINSBERG, 2017):

- RRI: intervalo entre os picos R-R das ondas PQRST, pode ser entendido como o período cardíaco. O RRI deve diminuir com o aumento do *stress* ou da carga de trabalho.
- BPM: batimentos cardíacos por minuto, caracterizados pela frequência cardíaca, ou seja, variável inversa ao RRI. A variável BPM tende a aumentar conforme uma atividade física é executada ou quando o sistema nervoso autônomo redistribui energia em uma situação de *stress* ou alta carga de trabalho.
- LnLF: transformação logarítmica da banda de frequência baixa do coração (0,04 a 0,15 Hz) o LF é uma medida no espectro da frequência ligado a regulação dos níveis de pressão arterial. Espera-se que o LnLF aumente com o aumento da carga de trabalho ou do *stress*.
- LnHF: transformação logarítmica da banda de frequência alta do coração (0,15 a 0,40 Hz). Respostas de baixa potência HF podem indicar um estado de stress, ansiedade ou até mesmo pânico. Espera-se que o LnHF diminua com o aumento da carga de trabalho ou do *stress*.
- LF/HF: como as medidas HF e LF são respectivamente associadas a respostas altas do sistema nervoso parassimpático e do sistema nervoso simpático, a relação de ambas pode refletir a predominância de uma resposta fisiológica sobre outra. Espera-se que a razão LF/HF aumente com o aumento da carga de trabalho ou do *stress*.

Resposta Galvânica da Pele - GSR

A resposta galvânica da pele, conhecida pela sigla *GSR*, derivada do termo em inglês *Galvanic Skin Response* pode ser entendida como a condutância elétrica que a pele exerce à passagem de uma corrente. O nível de suor na pele modifica a capacidade da pele em permitir

ou bloquear respostas elétricas (IMOTIONS, 2020). A resposta galvânica da pele é também conhecida como atividade eletrodérmica ou *EDA*, do termo em inglês *Electro-Dermal Activity*.

Normalmente, a saída *GSR* contém dois componentes. O primeiro é o nível tônico, também chamado de nível de condutância da pele (*SCL*, do termo *Skin Conductance Level*). Este componente depende de fatores como a hidratação natural da pele ou da temperatura ambiente e se modifica de forma lenta e gradativa, de acordo com a variação das condições ambientais impostas ao corpo humano. O segundo é a resposta de condutância da pele (*SCR*, do termo *Skin Conductance Response*) e apresenta mudanças rápidas que estão associadas a fatores emocionais como surpresa e *stress*. O *SCR* responde a alterações no sistema nervoso simpático que atuam nas glândulas sudoríparas para melhorar a distribuição térmica durante períodos de luta e fuga. Normalmente, apresenta um aumento rápido até um pico de *stress* e, em seguida, uma queda mais lenta (BOUCSEIN, 2012), (BRAITHWAITE, WATSON, *et al.*, 2015), (IMOTIONS, 2020).

Estudos publicados na literatura indicam uma forte correlação do *GSR* com o estado emocional e carga de trabalho cognitiva (NOURBAKSH, WANG e CHEN, 2013), (MIRANDA-CORREA, ABADI, *et al.*, 2018). Também foi demonstrado que as medidas de *GSR* são influenciadas pela interface homem-máquina (SHI, TAIB, *et al.*, 2007).

3.3 Considerações finais do capítulo

O estudo de modelos psicofisiológicos e a revisão de métodos para análise de fatores humanos são peças-chave na análise do impacto de uma modificação ou adição de determinada tecnologia com a qual o ser humano deve interagir.

Durante o treinamento de uma tarefa, a substituição de elementos do cenário por elementos virtuais pode impactar na performance e no aprendizado do sujeito em treinamento. A adição da interface correspondente ao dispositivo de realidade aumentada pode afetar diversos fatores humanos e alterar a resposta do sistema nervoso autônomo.

Nesta tese, as técnicas e modelos apresentados neste capítulo são utilizados para analisar a interação entre o piloto e um sistema de realidade aumentada no voo de formatura básico. Medidas de performance, carga de trabalho, *stress* e transferência de treinamento são a base para indicar quais as implicações, positivas e negativas do uso desse tipo de tecnologia.

4 Realidade Aumentada

Este capítulo apresenta uma fundamentação tecnológica sobre realidade aumentada. Inicialmente, é introduzido o conceito de realidade aumentada e descrevem-se os principais equipamentos de realidade aumentada em uso hoje. São apresentados equipamentos específicos para uso aeronáutico, como os *HUDs* (*Head-up Display*) e os *helmets*, além de dispositivos comerciais de uso comum como os *head mounted displays*, ou óculos de realidade aumentada. O capítulo finaliza-se com uma análise dos dispositivos disponíveis no CCM para uso na construção do protótipo utilizado nesta tese.

4.1 O conceito de realidade aumentada

A realidade aumentada não é um assunto novo. Muitas pesquisas que datam desde antes da década de 1970 tratam de equipamentos como óculos e painéis, capazes de aumentar as capacidades de operação do ser humano (CAUDELL e MIZELL, 1992); (SUTHERLAND, 1968); (FURNESS e KOCIAN, 1986).

Ambas a realidade aumentada e a realidade virtual trabalham com um tema central comum: a modificação da realidade sensorial percebida pelo ser humano, podendo utilizar qualquer um dos cinco sentidos para alterar a percepção de mundo do usuário. Enquanto a realidade virtual visa suprimir completamente a realidade e imergir o usuário no ambiente virtual, a realidade aumentada busca combinar elementos do mundo real com elementos virtuais.

Vários autores (MILGRAM, TAKEMURA, *et al.*, 1995), (FLAVIÁN, IBÁÑEZ-SÁNCHEZ e ÓRUS, 2019) consideram que a evolução do ambiente completamente virtual ao ambiente completamente real pode ser graduada de diferentes formas, dando origem a algumas variações do termo realidade aumentada, tais como virtualidade aumentada, realidade mixada e realidade estendida, conforme ilustrado na Figura 4-1.

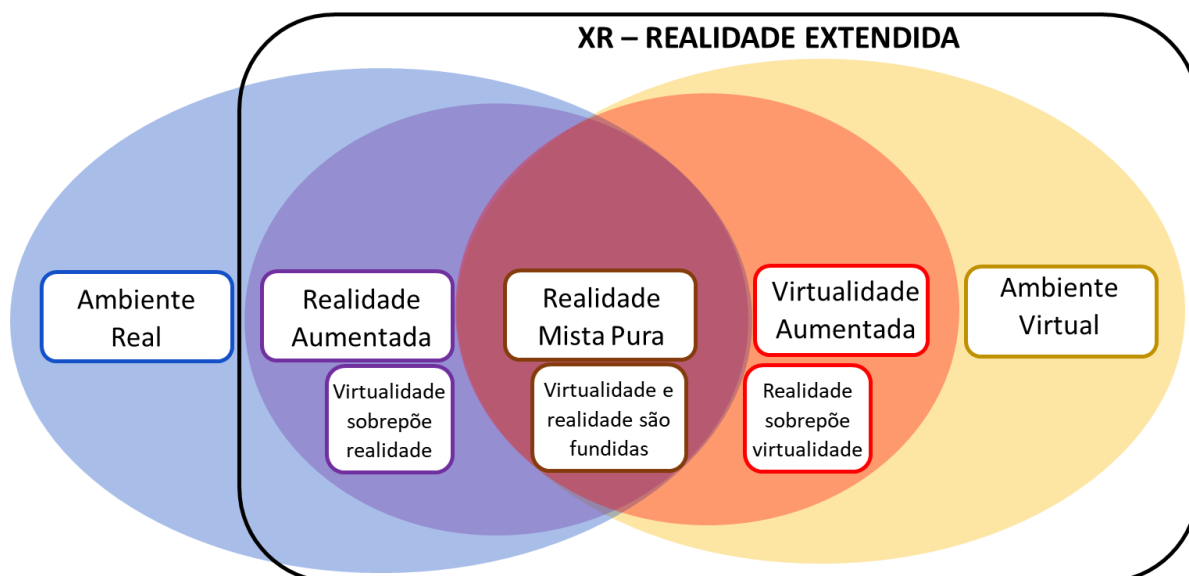


Figura 4-1. Da realidade ao ambiente virtual.

Os equipamentos de realidade virtual são capazes de, através de visores imersivos, luvas tácteis, fones com isolamento acústico, entre outros elementos, enclausurar as sensações do usuário em um ambiente virtual em substituição ao mundo real. Desta forma, o indivíduo se torna capaz de presenciar sensações fictícias, criadas por computador, em detrimento de perder consciência situacional sobre o ambiente que realmente o cerca.

A realidade aumentada, ao contrário da virtual, não substitui o ambiente real, mas o combina com elementos virtuais criando um “universo aumentado”, ou seja, o usuário não perde a consciência das características reais à sua volta. Ao invés disso, os elementos virtuais podem, inclusive, participar e interagir com o mundo real e em determinados casos, aumentar e completar a consciência situacional.

Assim como no caso da realidade virtual, a realidade aumentada pode ser aplicada aos cinco sentidos do ser humano. No entanto, a maioria absoluta das aplicações limitam-se ao visual e auditivo, eventualmente complementados pelo tátil.

Como exemplo de realidade aumentada de forma auditiva, dentro do escopo aeronáutico, citam-se (MILLER, HSI, *et al.*, 2018) e (GODFROY-COOPER, MILLER, *et al.*, 2018). Nestes trabalhos, os autores propõem um equipamento de aumento de consciência situacional baseado em um sistema auditivo espacial, para auxiliar pilotos de helicópteros a desviar de obstáculos em voos com degradação visual. O projeto *ARSAD (Augmented-Reality Spatial Auditory Display)* utiliza a ferramenta *SLAB3D* (Figura 4-2), desenvolvida pelo *Spatial Auditory Displays Lab* do Centro de Pesquisa *NASA AMES*. Esta ferramenta processa fontes sonoras localizadas em um espaço audível e renderizá-las em forma de estímulos auditivos de

caráter tridimensional. Em outras palavras, o programa transforma elementos físicos do espaço em som, conservando características de localização geográfica da fonte sonora. Este efeito é utilizado no Projeto *ARSAD* para posicionar estímulos sonoros em um ambiente com obstáculos, provendo para o piloto uma dimensão de consciência situacional que antes não seria possível.

A Figura 4-2 ilustra o uso da ferramenta *Slab3D* no Projeto *ARSAD*. Os pontos coloridos são focos de som e a cabeça é o ponto de recepção do áudio 3D. Os pontos azul, verde e rosa são estáticos, enquanto o foco vermelho é dinâmico, pois executa uma trajetória circular em torno da cabeça.

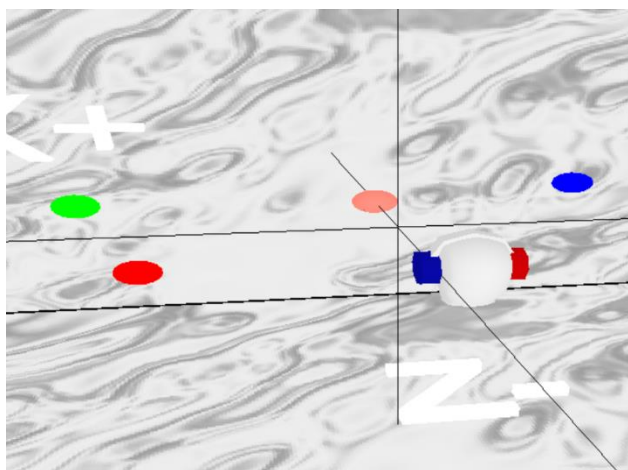


Figura 4-2. Utilização do *Slab3D* no Projeto *ARSAD*.

A realidade aumentada pode ainda ser aplicada para estimular e aumentar o sentido humano de tato. No escopo da aviação, a realidade aumentada tátil começou a ser explorada há cerca de 20 anos, com o *TSAS* (*Tactile Situation Awareness System*). Este sistema foi desenvolvido pelo exército americano para prover informações necessárias para a navegação de aeronaves através de estimulação vibro tátil aplicados no piloto, conforme ilustrado na Figura 4-3 (RAJ, SURI, *et al.*, 1998), (MAYER, 2001), (BRILL, LAWSON e ANGUS, 2014) (ANGUS, LAWSON e BASSO, 2016). Este colete vem sendo continuamente aprimorado e é utilizado principalmente em situações de visual degradado.



Figura 4-3. Colete TSAS.

Ainda no ambiente aeronáutico, outro método que vem sendo utilizado como forma de aumento da realidade é o projeto *HOTAS (Haptic Obstacle and Terrain Avoidance System)* desenvolvido no *ONERA – The French Aerospace Lab*, para fornecer à pilotos de helicóptero, um *feedback* tátil em forma de estímulos de força no *sidestick* da aeronave (BINET e RAKOTOMAMONJY, 2018).

As propostas para uso de realidade aumentada visual no setor aeronáutico são inúmeras. Como exemplo, citam-se o trabalho de (RAFI, RAJARAM, *et al.*, 2019), que utiliza um sistema visual para alertar o piloto sobre a saída do envelope de voo, e aquele de (PEREZ e BEHREND, 2019), que utiliza o HoloLens para prover um *checklist* em realidade aumentada para o piloto durante o voo (Figura 4-4).



Figura 4-4. *Checklist* em realidade aumentada (PEREZ e BEHREND, 2019).

Por fim, destaca-se a revisão realizada por (SAFI, PRADHAN e CHUNG, 2019) sobre o uso de realidade aumentada no setor aeronáutico. Neste trabalho, os autores analisam

aplicações de realidade aumentada em diversas atividades do setor, envolvendo desde manufatura e manutenção até uso pela tripulação no *cockpit*.

4.2 Dispositivos para Realidade Aumentada

Esta seção inicia-se com a introdução de duas das tecnologias utilizadas no ambiente aeronáutico que são consideradas percussoras da realidade aumentada: os *head-up displays* (HUDs) e os *helmet mounted displays*.

Na sequência, são introduzidos os óculos de realidade aumentada de uso comum, também conhecidos como *head mounted displays*. Observa-se que a sigla *HMD* não é utilizada nesta tese, uma vez que se aplica tanto para *helmet mounted displays* como para *head mounted displays*.

- **Head-Up Displays (HUDs)**

O HUD pode ser entendido como um painel translúcido, capaz de projetar informações sobre o voo. O equipamento é instalado em cockpits na linha dos olhos do piloto, com o objetivo de diminuir a quantidade de tempo de “*head down*”, ou seja, o tempo que o piloto permanece com sua cabeça abaixada focalizando as informações no *cockpit*.

O conceito de HUD provem de tecnologias utilizadas pela primeira vez em ambiente militar durante a segunda guerra mundial. Os primeiros equipamentos utilizados em aviões foram os *Gyro Gunsight MK IID*, ilustrados na Figura 4-5. Sua função estava relacionada com a mira de aviões inimigos. Apesar de não possuir nenhuma capacidade eletrônica de monitoramento, sua presença nas aeronaves permitia a mira correta mesmo durante curvas e deslocamentos não lineares das aeronaves (CUNNINGHAM, FORD, *et al.*, 1944).

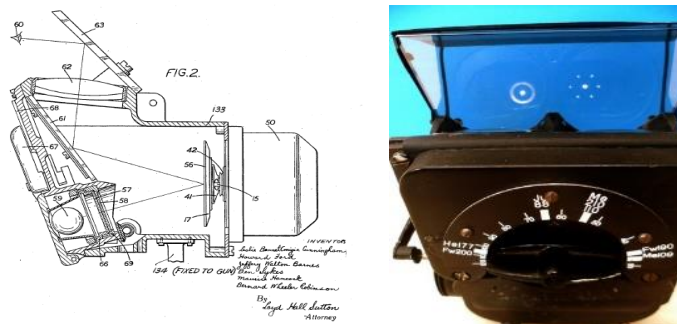


Figura 4-5. *Gyro Gunsight MK IID* (*Gyro Gunsight Mk IID*, 1944), (CUNNINGHAM, FORD, *et al.*, 1944) (VINTAGE AVIATION, 2019).

Com a modernização das aeronaves e o crescimento do mercado de aviação, os *HUDs* anteriormente utilizados para funções de guerra, passaram a disponibilizar informações de voo para o piloto, tais como altitude, atitude, velocidade, entre outras. Estas informações, apesar de serem iguais às apresentadas no painel, são exibidas na linha de visão do piloto, para que a atenção não seja dividida entre tempos de *head-up* e *head-down* (NICHOLL, 2014).

Mais recentemente, os *HUDs* têm evoluído na direção de se tornar dispositivos de realidade aumentada. Um exemplo são os *EVS* (*Enhanced Vision Systems*), ilustrados na Figura 4-6, capazes de projetar elementos tridimensionais simples, como uma pista de pouso, e corrigir desvios de paralaxe, isto é erros provocados pela visada em ângulo do observador sobre determinado elemento em sua tela (SAAB, 2019), (SPITZER, FERRELL e FERRELL, 2017).



Figura 4-6. Exemplo *HUD/EFVS* (SAAB, 2019).

Hoje, os *HUDs* são elementos certificados pelas agências regulatórias de aviação, tais como *FAA* (*Federal Aviation Administration*) e *ANAC* (Agência Nacional de Aviação Civil) (ANAC, 2014), (FAA, 2016). Contudo, estes dispositivos apresentam algumas restrições tais como campo de visão limitado, posicionamento fixo no cockpit e dependência da instalação de projetores para criação das imagens (NICHOLL, 2014).

- ***Helmet Mounted Displays***

Diferente dos *HUDs*, os *helmets* são equipamentos de voo do tipo *wearable*, ou seja, podem ser vestidos no corpo do piloto. Os primeiros exemplares destes equipamentos são da década de 1970. Eles se popularizaram durante o período da guerra fria, quando sofreram grandes modernizações (Figura 4-7) (ARTHUR, RANDALL, *et al.*, 2017).

Diferente dos *HUDs*, que em sua grande maioria apresentam informações de navegação, em redundância àquelas do painel, os *helmets* apresentam instrumentos que possibilitam o combate aéreo sem a perda de consciência situacional. A interface se move em conjunto com a cabeça do piloto, resolvendo, dessa forma, uma grande limitação dos *HUDs* (ARTHUR, RANDALL, *et al.*, 2015).

Outro grande benefício dos *helmets* para a aviação de caça é o acesso rápido às informações, sem a necessidade de localizar instrumentos ou desviar o foco do alvo, aumentando significativamente a consciência situacional (ARTHUR, RANDALL, *et al.*, 2017), (FOOTE e MELZER, 2015). Os sistemas de localização inercial permitem que certos elementos projetados se mantenham fixos em relação a aeronave, enquanto outros seguem o movimento da cabeça.



Figura 4-7. Rockwell Collins *HMD* (COLLINS AEROSPACE, 2019).

Hoje estão em desenvolvimentos *helmets* com capacidade de projetar qualquer tipo de informação plana ou tridimensional nos visores, incluindo a capacidade de prover ao piloto imagens de câmeras de visão noturna, permitindo voos com baixa luminosidade de forma precisa (COLLINS AEROSPACE, 2019). Apesar da evolução, os *helmets* estão limitados à aviação de caça e combate, e as funções disponibilizadas são específicas deste tipo de aviação (ARTHUR, RANDALL, *et al.*, 2015). O uso em outros tipos de aeronave permanece um campo a ser explorado.

- ***Head Mounted Displays***

Em geral, os dispositivos de uso comum que podem ser utilizados para implementação de realidade aumentada são classificados em duas categorias principais. A primeira corresponde

aos dispositivos do tipo *handheld*, que, como o próprio nome indica, requerem o uso das mãos, como no caso de tablets e smartphones. A segunda categoria são os *head mounted displays* e correspondem aos óculos de realidade aumentada.

Esta tese concentra-se nesta segunda categoria uma vez que o piloto deve ter as mãos livres para uso na atividade de pilotagem.

Os óculos de realidade aumentada têm como objetivo projetar, de forma realista e eficiente, informações ou elementos virtuais no espaço real (ROSENBERG, 1993). A pesquisa para o desenvolvimento de óculos com a capacidade de projetar elementos virtuais sobre o ambiente real iniciou-se há algum tempo. Um dos primeiros exemplos foi o sistema *Virtual Fixtures*, proposto por Rosenberg, que projetava dois braços robóticos sobre o braço real do operador, para que este seja capaz de manipular o robô de forma fluída, como se fossem seus próprios braços. Para executar a sobreposição virtual-real, Rosenberg utilizou um sistema óptico estereoscópico, que se projeta uma imagem em cada um dos olhos com ângulos defasados, deixando para o cérebro a responsabilidade de fundir as imagens em uma única figura, provendo a noção de profundidade (ROSENBERG, 1993).

Uma das empresas pioneiras em utilizar óculos de realidade aumentada de forma “popular” e versátil foi a *Google*, com o *Project Glass*. Como resultado deste projeto, a Google lançou, em meados de 2012, o *Google Glass* (Figura 4-8): um equipamento capaz de disponibilizar para o usuário informações de maneira virtual, utilizando visão monocular (GOOGLE, 2012).



Figura 4-8. *Google Glass* (GOOGLE, 2019).

Entre 2013 e 2016, a *Microsoft* registrou diversas patentes relacionadas a *head-mounted displays*, tais como o *headset visor enclosure* (MICROSOFT, 2015) e o *virtual place-located anchor* (MICROSOFT, 2016), sinalizando o lançamento de seu próprio óculos de realidade aumentada, o *HoloLens*. Este equipamento conta com um sistema operacional *Windows 10* embarcado e possui capacidade de sensoriamento do ambiente similar ao sistema *Kinect*, também da *Microsoft*. Estas características permitem que o *HoloLens* projete uma realidade aumentada com capacidade de interagir com o usuário e o ambiente a sua volta. O lançamento do *HoloLens* marcou o início de um período de popularização dos óculos de realidade

aumentada e o desenvolvimento de outros equipamentos como por exemplo os óculos da *Epson* e *MetaVision* (EPSON, 2019).

4.3 Seleção de dispositivo de realidade aumentada

Nesta seção analisam-se, de forma comparativa, as funcionalidades e características de alguns óculos de realidade aumentada disponíveis no CCM. A partir da análise comparativa dos equipamentos, seleciona-se aquele mais adequado para uso no desenvolvimento de um protótipo de realidade aumentada.

Utiliza-se como base o trabalho desenvolvido por Masiero, (2019), que apresenta uma análise comparativa de equipamentos de realidade aumentada. Entre as características escolhidas para comparação de dispositivos destacam-se:

- Campo de visão (FOV, acrônimo para *field-of-view*): define a amplitude da área no visor disponível para projeção de elementos virtuais;
- Sensores: caracteriza os tipos e capacidades dos sensores que compõem o equipamento;
- Conectividade: define os métodos de conectividade, rede e integração existentes no equipamento, além de especificar se o equipamento é capaz de implementar comunicação *wireless* ou se é necessário a presença de cabeamento. Exemplos são: conexão via UDP, TCP, *Bluetooth*, entre outros.

Além disso, adiciona-se as seguintes características à lista proposta por Masiero:

- Capacidade de interação: identifica os métodos disponíveis no equipamento para interagir com o mundo real.
- Portabilidade: indica a mobilidade do usuário quando usando o equipamento, ou seja, a capacidade do equipamento poder ser movido e embarcado no local de sua aplicação.



(a) *HoloLens V1*



(b) *Meta 2*



(c) *Epson Moverio BT350*

Figura 4-9. Equipamentos de realidade aumentada disponíveis no CCM.

A Tabela 4-1 ilustra o resultado desta análise comparativa, considerando os equipamentos disponíveis no laboratório (ilustrados na Figura 4-9). Na última coluna, são

indicados os requisitos desejáveis para um protótipo de sistema de realidade aumentada para voo em formação.

Tabela 4-1. Análise comparativa (EPSON, 2019), (MICROSOFT, 2019), (SAMSUNG, 2019).

Parâmetro	Equipamentos			Requisito da aplicação
	Microsoft HoloLens V1 Figura 4-9 (a)	Metavision Meta 2 Figura 4-9 (b)	Epson MoveRio BT350 Figura 4-9 (c)	
<i>FOV</i>	30°	90°	23°	Pelo menos 30°, preferencialmente maior
<i>Sensores</i>	IMU; câmera de profundidade; câmera HD 2MP; 4 microfones; sensor de iluminação; 4 câmeras de compreensão ambiental	IMU; sensor de reconhecimento de mãos; câmera HD; microfone	Câmera 5MP; IMU; GPS; sensor de iluminação; microfone	Capacidade de reconhecimento de posicionamento; capacidade de reconhecimento de imagens; capacidade de captação de voz
<i>Conectividade</i>	<i>Wi-fi e bluetooth</i>	Dependente do controlador	<i>Wi-fi e bluetooth</i>	Preferencialmente <i>wi-fi</i>
<i>Capacidade de interação externa</i>	Análise de imagens e reconhecimento ambiental	Análise de imagens e reconhecimento ambiental	Análise de imagens	Análise de imagens e reconhecimento ambiental
<i>Portabilidade</i>	Embarcado	Cabeado a PC de controle	Embarcado	Embarcado
Resultado	Satisfaz	Não satisfaz	Não satisfaz	-

Com base na análise apresentada, seleciona-se os óculos *HoloLens* para o desenvolvimento do protótipo de sistema de realidade aumentada para treinamento de voo em formação.

É importante salientar que os dispositivos de realidade aumentada do tipo *head mounted display* ainda apresentam limitações significativas para aplicações em voo, mas estão evoluindo rapidamente.

Um aspecto crítico é a atualização da imagem projetada em função da movimentação do usuário. Os óculos de realidade aumentada em geral utilizam algoritmos *SLAM* (*Simultaneous Localization And Mapping*, em português, mapeamento e localização simultâneos), para criar um mapeamento 3D do ambiente, navegar e posicionar seus elementos no ambiente (MATHWORKS, 2021). Em um conjunto de testes simples, realizados pelo autor desta tese com um veículo automotivo em movimento, foi possível observar que o *HoloLens* perde facilmente seu referenciamento devido ao conflito de informações entre a câmera, que

percebe pouco movimento do dispositivo em relação a referências no painel do veículo, e a unidade *IMU*, que além dos movimentos da cabeça do indivíduo dentro do veículo, captura também o movimento do próprio veículo.

Esse teste simples deixou evidente que a tecnologia ainda precisa amadurecer para o tipo de aplicação almejado nesta tese. Por outro lado, observa-se que essa evolução de fato tem acontecido de forma significativamente rápida.

Os testes realizados no veículo automotivo, assim como o protótipo desenvolvido para esta tese, utilizaram a primeira versão do *HoloLens*. Recentemente, a fabricante do dispositivo lançou a segunda versão, onde várias limitações da primeira versão foram superadas. Destaca-se em particular a possibilidade de externalizar as informações dos sensores e permitir ao usuário desenvolver suas próprias rotinas para posicionamento dos elementos virtuais. Essa abordagem foi utilizada no trabalho desenvolvido por (WALKO e MAIBACH, 2021), onde os autores apresentam o desenvolvimento e teste em voo real de helicóptero de uma aplicação com o *HoloLens 2*, baseada em sensoriamento externo e fusão de dados. Apesar das limitações ainda identificadas, o trabalho comprova a possibilidade de uso em um ambiente dinâmico.

Outra limitação identificada no teste realizado em veículo automotivo refere-se à iluminação e ao contraste dos hologramas. A incidência luminosa externa alta torna difícil o uso dos óculos em áreas externas e a cor escura das lentes estereoscópicas complica o uso em ambientes mal iluminados. Essas limitações também foram endereçadas de alguma forma na nova versão do *HoloLens*.

Observa-se que muitas das limitações ainda existentes nos óculos de realidade aumentada de uso comum já foram de alguma forma superadas nos dispositivos do tipo *helmet*, utilizados em ambiente militar. Por outro lado, os *helmets* possuem recursos muito limitados em relação à programação das informações projetadas. Não é objetivo desses dispositivos projetar imagens com aparência de objetos reais. Além disso, o desenvolvimento de aplicações é restrito ou controlado pelo fabricante do dispositivo. Os *helmets* em geral não são plataformas abertas que podem ser programadas pelo usuário.

Espera-se que, do ponto de vista tecnológico, uma solução satisfatória para uso em voo possa ser obtida incorporando e adaptando soluções de sensoriamento usadas nos dispositivos do tipo *helmet* às novas versões dos óculos de realidade aumentada.

Concluindo, apesar das limitações apresentadas pelo dispositivo selecionado, este atende aos propósitos da presente tese no sentido que permite investigar, ainda que em ambiente de simulação, o impacto sob o piloto da introdução da realidade aumentada para voo em formatura básica.

4.4 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou o conceito de realidade aumentada, os principais equipamentos existentes, e ilustrou alguns exemplos de aplicações no setor aeronáutico. A revisão apresentada permitiu analisar as possibilidades e identificar limitações quanto a acessibilidade e versatilidade da tecnologia para o treinamento de voo em formação.

Conforme discutido anteriormente, a tecnologia hoje disponível ainda apresenta limitações, entre as quais se destacam os métodos utilizados para o referenciamento das imagens holográficas por unidades inerciais, que inviabilizam seu uso em situações de alta dinâmica, e o contraste da imagem em ambiente com forte iluminação, que dificulta seu uso em ambientes externos. Devido a essas limitações, a presente tese opta por investigar o uso da tecnologia num simulador sem movimento e onde o sistema visual apresenta brilho controlado.

A proposta de soluções tecnológicas para esses desafios extrapola o escopo desta tese, pois considera-se que as próprias empresas fabricantes dos dispositivos têm investido esforços nessa direção, conforme comprovado pelas versões recentemente lançadas. Além disso, observa-se o registro de patentes diversas sobre *head mounted displays*, com interfaces programáveis e versáteis, sugerindo uma evolução rápida da tecnologia, com a superação das limitações identificadas num futuro próximo, possibilitando assim seu uso em voo.

5 Análise de Dados de Voo Real

Este capítulo apresenta uma análise realizada utilizando dados coletados em voos reais, por meio de sensoriamento fisiológico do piloto. Esta coleta de dados foi realizada com o apoio do Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV) do DCTA e tem como objetivo caracterizar o voo em formação como treinamento propício para realização usando sistema de realidade aumentada. Para finalizar, descreve-se as principais etapas do voo em formação básica.

5.1 Campanha de voo

A coleta de dados utilizada para caracterização das manobras foi realizada durante uma campanha de treinamento em helicóptero da Força Aérea Brasileira executada a partir da Base Aérea de Natal, utilizando helicópteros H-36 Caracal.

Participaram da campanha 4 pilotos da Força Aérea Brasileira, que foram equipados com um conjunto de sensores fisiológicos composto por *eye-tracker*, *GSR* e *ECG*. A análise apresentada neste capítulo utiliza apenas dados do *eye-tracker*, portanto, detalha-se apenas a característica desse equipamento.

O *eye-tracker* utilizado, da marca *Tobii Pro Glasses 2*, é ilustrado na Figura 5-1. Este equipamento é capaz de rastrear os movimentos dos olhos do piloto e executar a sincronização deste dado com o vídeo coletado em primeira pessoa pela sua câmera frontal. Este sensor tem o potencial de exibir as técnicas de visada do piloto, os pontos de foco de atenção, além de executar medições sobre tamanho de pupila e frequência de piscadas, variáveis associadas ao nível de *stress* e carga de trabalho (TOBII PRO INSIGHT, 2019).



Figura 5-1. *Eye-tracker Tobii Pro Glasses 2*.

A coleta de dados foi realizada durante a execução de 8 tarefas de voo que requerem capacidades e habilidades distintas dos pilotos. São elas:

1. Voo pairado DES (Dentro do Efeito Solo): o piloto deve voar pairado, ou seja, mantendo seu posicionamento constante (ou próximo a isso) por 30 segundos (esta missão deve ser executada com e sem o piloto automático - AP).

2. Voo nivelado 135 KIAS (*Knots - Indicated Airspeed*): o piloto deve voar com velocidade estabilizada em 135 nós durante 1 minuto (esta missão deve ser executada com e sem o piloto automático).
3. Voo com aproximação final por ILS: o piloto deve executar uma aproximação de pista com uso do ILS (*Instrument Landing System*), mantendo-se dentro dos limites de *glide-slope* e *localizer*, e mantendo razão de descida de 550 pés/min até altitude de 200 pés.
4. Curva Nivelada a 180°: o piloto deve realizar uma curva nivelada à esquerda com velocidade de 120 nós a uma altitude de 500 pés.
5. Decolagem CAT A monomotor área-livre: o piloto deve decolar normalmente sem impedimento e simular uma falha de motores no TDP (*Takeoff Decision Point* – Ponto de Decisão de Decolagem) (35 kt/30 ft), sendo que a operação CAT- A se refere a *category A*, um procedimento de operação que presume a operação do helicóptero de maneira a permitir, se houver falha de motor, um pouso seguro ou uma decolagem fora do ponto de falha e a manutenção de estabilização de voo.
6. Decolagem CAT A monomotor pontual: o piloto deve decolar normalmente e simular uma falha do TDP pontual (H1 = 130 ft). O piloto não deve utilizar o auxílio do GO AROUND.
7. Arremetida monomotor pairado FES (Fora do Efeito Solo): o piloto deve, a partir de um voo pairado, simular a falha dos motores.
8. Voo em formação - curva 360° em Ala para fora: o piloto deve realizar uma curva de 360° à esquerda, seguindo seu Líder em um voo de formação mantendo Ala à esquerda.

As manobras de voo foram distribuídas entre os quatro pilotos conforme a Tabela 5-1. De acordo com a qualidade dos dados coletados, selecionou-se um voo de cada tarefa para análise.

Tabela 5-1. Distribuição das situações de voo por piloto.

	Tarefa	Pairado DES	Nivelado 135 KIAS	Aproximação Final ILS	Curva nivelada 180°	Decolagem Cat A Monomotor área livre	Decolagem Cat A Monomotor pontual	Arremetida Monomotor pairado FES	Voo em formação - Curva 360° em Ala para fora
Piloto	A				*	*		*	
	B	*					*		
	C		*	*					
	D								*

*voos utilizados para análise *eye-tracker*.

Ao final de cada tarefa realizada, além dos dados fisiológicos, os pilotos foram instruídos a assinalarem duas avaliações subjetivas de carga de trabalho: o questionário *Cooper-Harper*, para avaliação das qualidades de pilotagem da aeronave quando realizando a tarefa, e o questionário de *workload Bedford*, referente à carga de trabalho. Em ambos os casos, o piloto deve atribuir uma nota de 1 a 10, onde 1 equivale a situação de menor carga de trabalho.

5.2 Processamento dos dados coletados

A primeira análise realizada refere-se ao processamento dos dados coletados pelo *eye-tracker*, correspondentes ao rastreo das pupilas do piloto. Esta análise tem o objetivo de determinar os focos de atenção durante o voo, a partir dos quais estima-se a consciência situacional e as estratégias de monitoramento de cockpit utilizadas pelo piloto.

Para executar esta análise, selecionou-se um exemplar de cada uma das 8 tarefas para avaliação das estratégias de rastreo e visada do piloto durante o voo. Elaborou-se, então, um mapa de calor que aponta os locais de concentração da atenção do piloto por meio de uma escala de cores onde o vermelho representa pontos de maior atenção e o verde pontos de menor atenção.

Para localizar cada manobra num voo, utilizam-se os relatórios experimentais gerados durante os voos de ensaios, com os tempos limites de cada execução. Uma vez localizados os trechos de interesse, os vídeos são processados manualmente para sobrepor o mapa de calor a uma imagem de referência da área de interesse do *cockpit*. A Figura 5-2 apresenta os mapas de calor de cada manobra.



a) Voo pairado DES sem Piloto Automático



b) Voo nivelado sem piloto automático



c) Voo de aproximação ILS



d) Curva 180°



e) Decolagem CAT A Monomotor área livre



d) Decolagem CAT A monomotor pontual



e) Arremetida monomotor pairado FES



f) Voo em formação

Figura 5-2. Mapas de calor obtidos a partir de dados do *eye-tracker*.

Na sequência, processou-se as respostas aos questionários de *Cooper Harper* e *Bedford*. Os resultados são apresentadas na Tabela 5-2 e na Tabela 5-3, respectivamente.

Tabela 5-2. Respostas ao questionário de *Cooper-Harper*.

	Pairado DES		Nivelado 135 KIAS		Aproximação ILS	Curva 180°	Decolagem área livre	Decolagem pontual	Arremetida	Voo em formação
	AP1/2 ON	AP1/2 OFF	AP1/2 ON	AP1/2 OFF						
	CH	CH	CH	CH						
Piloto A	2	4,5	--	--	--	4	5	3	6	--
Piloto B	2	4,5	2		3			4	5	--
Piloto C	3	4	3	4	4	6	5	4	--	--
Piloto D	--	--	4	4,5	5	--	--	--	--	--

Tabela 5-3. Respostas ao questionário de Bedford.

	Pairado DES		Nivelado 135 KIAS		Aproximação ILS	Curva 180°	Decolagem área livre	Decolagem pontual	Arremetida	Voo em formação
	API/2 ON	API/2 OFF	API/2 ON	API/2 OFF						
	WL	WL	WL	WL						
Piloto A	2	6	--	--	--	4	6	4	6	--
Piloto B	3	4	3	--	4	--	--	6	5	--
Piloto C	3	5	4	5	5	6	5	5	--	--
Piloto D	--	--	4	6	5	--	--	--	--	5

Com base na análise combinada dos mapas de calor e resposta aos questionários observa-se que:

- O voo pairado e o voo nivelado sem piloto automático apresentam atenção distribuída entre o ambiente externo e o *cockpit*. Ambas as manobras foram classificadas pelos pilotos como de carga de trabalho relativamente alta. Isso é justificado pela degradação das qualidades de voo da aeronave sem o auxílio do piloto automático, o que eleva a dificuldade para manter os mesmos parâmetros de desempenho da tarefa.
- O voo de aproximação ILS resulta num foco de atenção concentrado em 3 instrumentos de voo: altímetro, indicador de velocidade e ILS (que informa o posicionamento da aeronave em relação a rampa de aproximação com o aeródromo). As notas de carga de trabalho para esta condição são medianas. O piloto não é capaz de dar atenção necessária a outra tarefa, o foco se mantém prioritariamente na tarefa principal. Este processo apresenta uma característica de constante ‘*head-down*’.
- No caso de curva 180°, o piloto concentra-se em rastrear a atitude de *bank* da aeronave, mantendo o foco no horizonte artificial na maior parte do tempo. Este caso em particular pode estar relacionado a altitude elevada do voo de 500 ft, caso a operação tivesse sido realizada em altitude menor, o voo poderia apresentar característica mais visual, em virtude da proximidade de obstáculos. Quando comparado ao voo ILS, tem-se, adicionalmente, uma pequena distribuição de atenção espalhada por pontos diversos do ambiente exterior. A carga de trabalho associada a esta manobra também foi comparativamente elevada.
- De forma semelhante a curva de 180°, durante a arremetida o piloto concentra seu foco no *cockpit*, uma vez que, após a falha de um dos motores, o piloto deve agir nos comandos rapidamente para controlar a rotação do rotor principal e acelerar a aeronave de forma a ter velocidade à frente ideal antes de estar próximo ao solo. As poucas vezes que olha para fora é para confirmar o local de pouso. Esta manobra foi considerada pelos pilotos como sendo a de maior carga de trabalho e dificuldade de pilotagem, visto que é um procedimento de emergência realizado em um período de tempo muito curto.

- No caso do voo em formação, diferentemente das demais manobras, o piloto concentra sua atenção exclusivamente no elemento exterior (aeronave Líder), sem desvios para o *cockpit*, tendo em vista que o objetivo é manter a posição relativa das aeronaves. Observa-se também que o local do foco apresenta dimensões significativamente pequenas (pequeno *field-of-view*), conforme pode ser visualizado na Figura 5-3. Neste caso, é evidente que a atenção do piloto se concentra apenas na parte traseira da aeronave Líder. Finalmente, a carga de trabalho indica reduzida capacidade extra para tarefas adicionais, tamanha a necessidade de focar a atenção no voo.



Figura 5-3. Mapa de calor do voo em formação.

A partir de mapas de calor elaborados com os dados do *eye-tracker* é possível verificar como a atenção do piloto é distribuída ou concentrada durante o voo. Observou-se em alguns casos que o piloto alterna constantemente entre posições ‘*head up*’ e ‘*head down*’. No caso do voo em formação, observou-se que toda a atenção do piloto é concentrada na aeronave Líder, em detrimento do *cockpit*. O foco e a atenção do piloto são dirigidos exclusivamente para o ambiente externo. Esta demanda se dá pela presença da aeronave Líder que comanda a missão e se torna parâmetro de posicionamento para o Ala.

O voo em formação, diferente dos outros casos estudados, apresenta um grande risco de *mid-air-collision*, intrínseco à sua execução, devido à proximidade das aeronaves durante a missão.

Pelo acima exposto e pela relevância do tema para FAB (Força Aérea Brasileira), o voo de formação foi escolhido como o objeto de interesse para esta tese.

Dentre os diversos tipos de voo em formação a próxima seção detalha o voo em formação básica.

5.3 Voo em formação básica

O voo em formação básica é normalmente empregado em missões de instrução, demonstrações aéreas ou ainda quando as condições de visibilidade não permitirem outro tipo de formação. Destaca-se pela rigidez na manutenção da posição relativa entre as aeronaves, diferentemente, por exemplo, das formaturas táticas, que são utilizadas no emprego efetivo operacional de uma aeronave militar e são menos rígidas em termos de posição relativa.

As etapas de um voo em formação básica são ilustradas no fluxograma da Figura 5-4.

O voo em formatura básica inicia com decolagem da aeronave Ala (aeronave secundária, que deve seguir o Líder). Esta decolagem pode ser em formação ou individual. No último caso, o Líder deve ser localizado e a reunião da formação (encontro no ar) deve ser executada.

Após a reunião, a aeronave Ala deve manter formação com o Líder durante toda execução da missão (treinamento, demonstração aérea, acrobacias etc.). Ao mesmo tempo, o Líder ou mesmo o próprio Ala pode requisitar o escalonamento de seus Alas (mudança de posicionamento lateral dentro da formação, como, por exemplo, a mudança do voo da asa esquerda para a direita do Líder) ou mudança de tipo de formação e alteração na distância entre as aeronaves (por exemplo, formação cerrada, ataque 2, ataque *trail*, dentre outras).

A qualquer momento durante o voo em formação ou em condições de emergência de alguma das aeronaves da esquadrilha, pode ser comandada pelo Líder ou pelos Alas a “espirrada” de alguma aeronave, que consiste na mesma se afastar da formação a fim de evitar a aproximação além dos limites de proximidade relativa estabelecidos ou para evitar situação de risco.

O fim do voo é marcado pelo retorno das aeronaves à base em formação, ou através da dispersão procedida pelo pouso individualizado, sendo que a dispersão consiste em encerrar o voo em formação ainda no ar, a partir da separação das aeronaves em defasagem de tempo ou de proa relativa. Observa-se que, em qualquer momento durante o procedimento, o piloto Líder também pode comandar a dispersão da formação, se detectar algum evento com potencial de arriscar a integridade das outras aeronaves, como por exemplo em entrada em condições meteorológicas de baixa visibilidade.

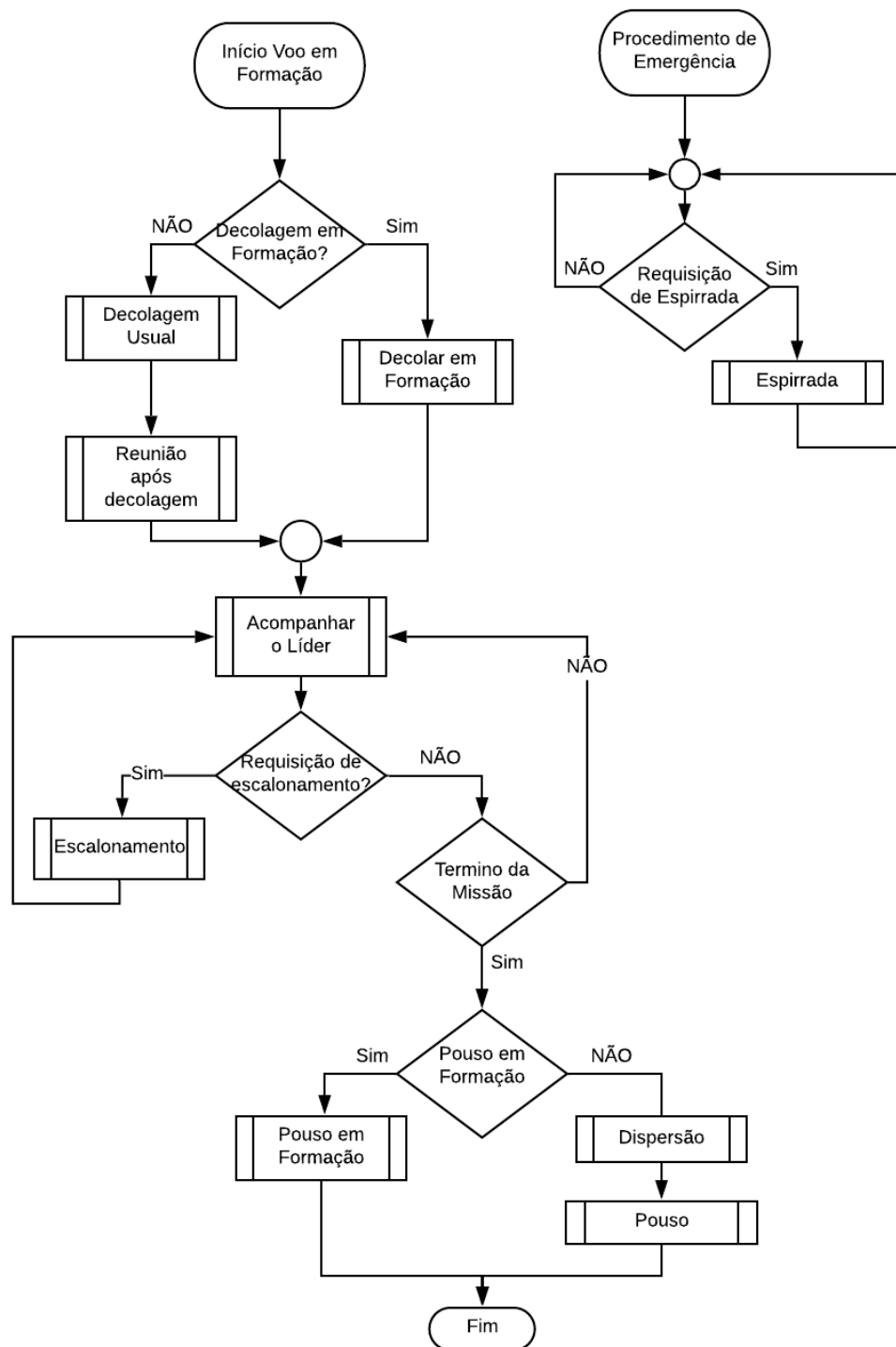


Figura 5-4. Fluxograma do voo em formatura básica.

5.4 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou uma análise realizada a partir de dados coletados em voos reais, durante diferentes manobras. Os dados coletados correspondem a medidas obtidas a partir de

um sensor do tipo *eye-tracker* e a respostas a questionários relativos à carga de trabalho (*HQR e Bedford*). Como conclusão, observou que o voo em formação se caracteriza por uma carga de trabalho elevada e se destaca pela concentração da atenção do piloto quase que exclusivamente na aeronave Líder, configurando uma manobra adequada para treinamento usando um sistema de realidade aumentada.

Dentre os diversos tipos de voo em formação, esta tese considera o voo em formação básica para implementação em protótipo integrado a ambiente de simulação, dada sua simplicidade e maior facilidade de execução por parte de pilotos com diferentes níveis de experiência.

6 Desenvolvimento de Protótipo

Este capítulo detalha o desenvolvimento de um protótipo do tipo “prova de conceito” de um sistema de realidade aumentada para treinamento de voo em formatura básica. Esse protótipo é integrado ao um simulador de voo de alta fidelidade, o simulador SIVOR, disponível no Centro de Competência em Manufatura do ITA.

O objetivo desse protótipo é permitir a realização de experimentos, numa etapa inicial de estudo de viabilidade, para identificar benefícios e limitações do uso de realidade aumentada em voo. Para tanto, considera-se a premissa, amplamente adotada por pesquisadores da área Aeronáutica, que experimentos realizados num ambiente de simulação permitem aumentar o conhecimento sobre uma nova tecnologia e sobre como ocorre a interação dessa tecnologia com o ser humano, contribuindo assim para o amadurecimento da tecnologia, apesar das diferenças entre o ambiente de simulação e o voo real.

No contexto desta tese, almeja-se a realização de experimentos que permitam comparar o comportamento do piloto da aeronave Ala e sua percepção do treinamento para as seguintes situações: (a) voo em formação onde a aeronave Líder é uma aeronave real; (b) voo em formação onde a aeronave Líder é uma projeção em óculos de realidade aumentada integrado à aeronave Ala.

A comparação das situações (a) e (b) é traduzida para a seguinte comparação a ser realizada no simulador SIVOR: (c) voo em formação onde a aeronave Líder é projetada pelo sistema visual do simulador SIVOR; (d) voo em formação onde a aeronave Líder é uma projeção em óculos de realidade aumentada integrado ao simulador SIVOR. Nesta tradução da situação real para o ambiente de simulação considera-se que, do ponto de vista visual, a aeronave Líder quando projetada pelo sistema visual do simulador SIVOR (situação (c)) encontra-se perfeitamente integrada ao ambiente externo e portanto, seria equivalente a situação em que a aeronave é real (situação (a)). Da mesma forma, a situação (b), onde o Líder é uma projeção holográfica no mundo real, pode ser entendida como equivalente a situação (d) onde, dentro do simulador, projeta-se a aeronave Líder através de um óculos AR (Figura 6-1).

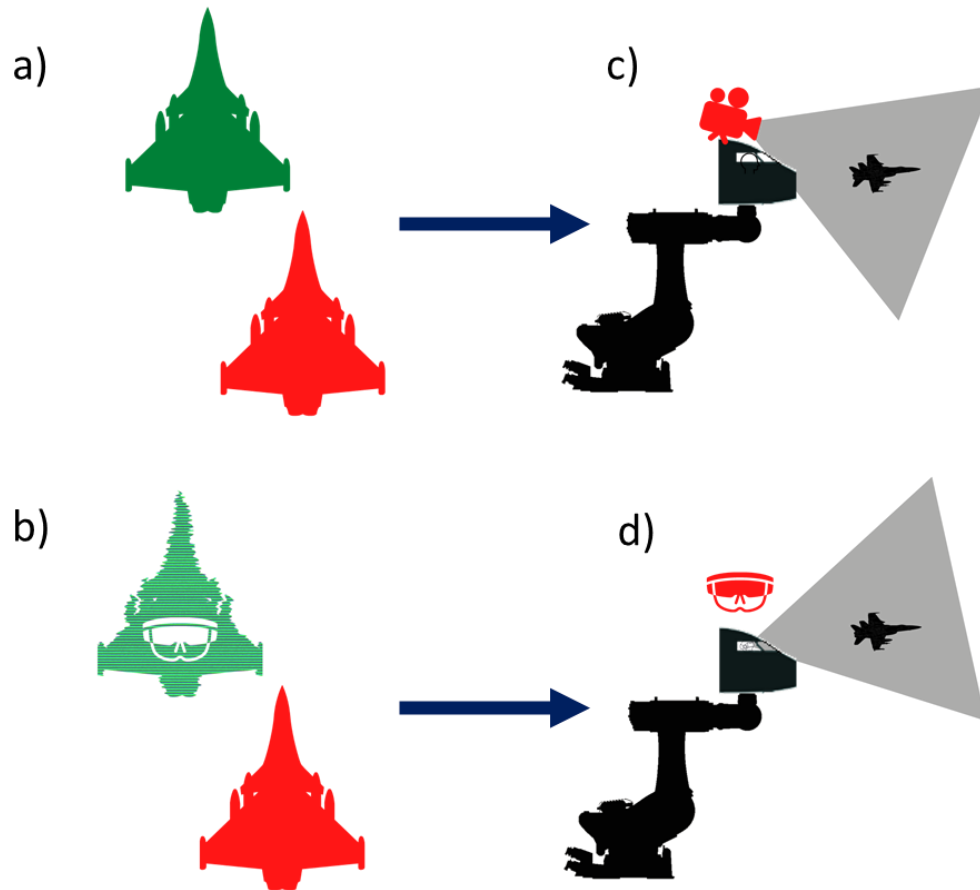


Figura 6-1. a) Voo real total; b) Voo real com Líder holográfico; c) Voo simulado com Líder projetado em tela; d) Voo simulado com Líder holográfico;

Este capítulo está organizado da seguinte forma. Inicialmente apresenta-se uma breve introdução sobre a arquitetura de *hardware* e *software* do simulador SIVOR e sobre as alterações realizadas nessa arquitetura para inclusão e integração do protótipo do sistema de realidade aumentada. Em seguida detalham-se os principais componentes do protótipo desenvolvido, que utiliza como dispositivo de realidade aumentada os óculos *Hololens*, conforme seleção apresentada na Seção 4.3.

6.1 Arquitetura do protótipo integrado ao simulador SIVOR

O SIVOR é um simulador de voo de base robótica desenvolvido no ITA por meio de um projeto de pesquisa em parceria com a empresa EMBRAER e financiado pela FAPESP. O simulador SIVOR foi concebido como um simulador de alta fidelidade, compatível com o nível de certificação D adotado na aviação civil. O *cockpit* do simulador SIVOR é baseado na aeronave *Legacy* da EMBRAER, assim como o modelo aerodinâmico atualmente integrado no simulador. Para prover sensação de movimento ao piloto, o simulador SIVOR conta com um robô antropomórfico de 6 graus de liberdade acoplado a uma unidade linear, que atua como sétimo grau de liberdade.



Figura 6-2. *Cockpit* do Simulador SIVOR.

Do ponto de vista de controle e gerenciamento da informação, os principais sistemas que compõe o simulador SIVOR são ilustrados na Figura 6-3. O piloto atua sobre o sistema por meio dos comandos disponibilizados na cabine do SIVOR, que incluem manche, manete de potência, comandos para *flaps*, trem-de-pouso, entre outros. Os comandos são transmitidos pela rede SECT, uma rede de comunicação em tempo real desenvolvida pela Embraer, e são fornecidos como entrada para o modelo aerodinâmico. Esse modelo foi desenvolvido em *MatLab* e é executado no formato de uma *DLL* num computador do tipo *PC* industrial. Com base nas entradas do piloto, o modelo define o comportamento da aeronave em voo, fornecendo como saída posição, orientação, velocidade e aceleração da aeronave, entre outras variáveis. A saída do modelo é enviada para o sistema visual, que utiliza a solução comercial X-Plane, e para o *software* denominado *wash-out*. O sistema visual define, com base nas informações recebidas, a imagem a ser projetada por um conjunto de projetores na tela externa ao *cockpit*. Por sua vez, o *software wash-out*, desenvolvido *in-house* em *LabView*, é responsável por transformar o movimento da aeronave para o espaço de trabalho do robô e em função disso, determinar as informações a serem enviadas para o controlador do robô. Como retorno, o piloto visualiza as informações disponibilizadas pelo sistema de aviação e as imagens projetadas pelo sistema visual. Além disso, percebe também o movimento imposto pelo robô.

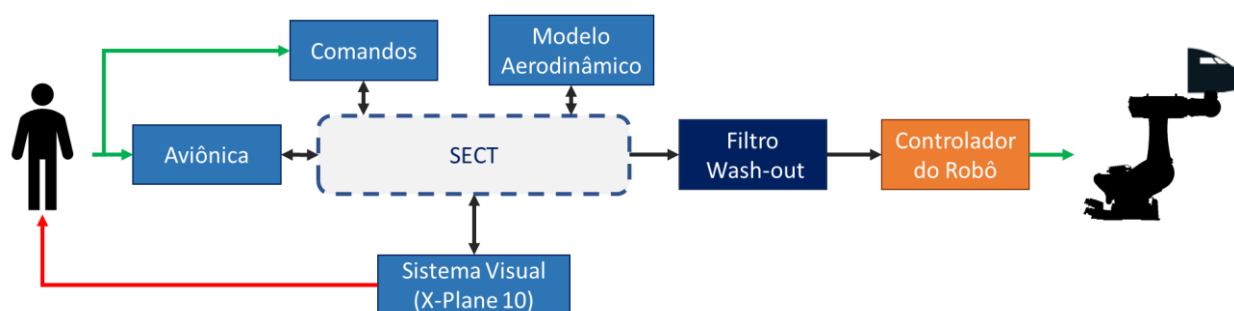


Figura 6-3. Arquitetura do simulador SIVOR.

Para uso com o sistema de realidade aumentada, o sistema de movimentação baseado na plataforma robótica é desativado. Isso porque o movimento da plataforma robótica interfere com o sistema de auto localização dos óculos de realidade aumentada, impedindo atualização da imagem projetada.

A arquitetura do simulador SIVOR é alterada, de acordo com o ilustrado na Figura 6-4. Os componentes *wash-out* e controlador do robô são excluídos da arquitetura. É adicionado um sistema supervisor, desenvolvido em *LabView*, para receber os dados referentes à trajetória

da aeronave Líder, coordenar e monitorar a simulação integrada com o sistema de realidade aumentada. Além disso, adiciona-se um *plug-in* ao sistema visual, com a função de configurar e controlar a visualização da aeronave Líder no caso em que ela é projetada pelo sistema visual. Para finalizar, embarca-se um *software* desenvolvido em *Unity* no dispositivo de realidade aumentada.

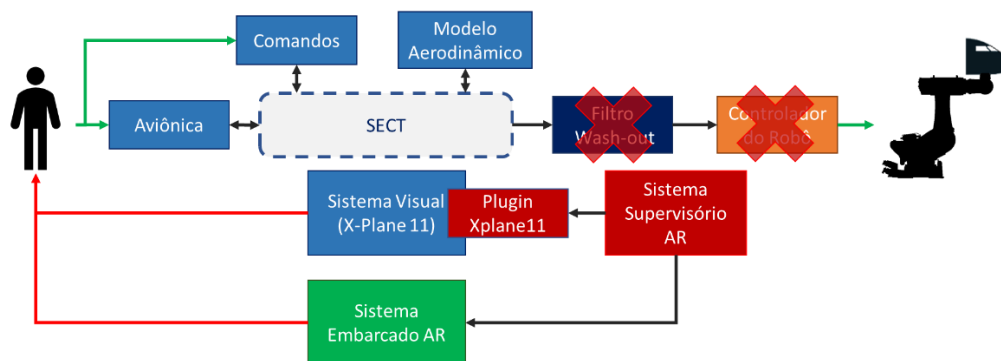


Figura 6-4. Arquitetura do simulador SIVOR com sistema de realidade aumentada.

É desejável que a proposta apresentada na Figura 6-4 seja flexível no sentido de permitir que o voo da aeronave Líder possa ser definido de diferentes formas, tais como: reprodução a partir de voo pré-gravado (arquivo de *playback*), piloto real externo *in-the-loop*, piloto automático definido por inteligência artificial, entre outros.

No entanto, observa-se que, para a campanha experimental descrita no Capítulo 7, apenas a execução a partir de arquivo de *playback* é exercitada. Para atender aos objetivos desta tese, é importante que o sistema projetado tenha capacidade de reproduzir repetidas vezes o mesmo voo da aeronave Líder, seja no sistema visual do SIVOR seja nos óculos de realidade aumentada, permitindo assim uma análise comparativa. As demais formas de geração de trajetória são deixadas para campanhas experimentais futuras.

6.2 Plug-in AR

Observa-se inicialmente que, para o desenvolvimento do sistema descrito neste capítulo, foi necessária a atualização do aplicativo X-Plane utilizado pelo sistema visual do simulador SIVOR para versão 11, que permite um *field-of-view* de 180° utilizando 3 projetores com imagens combinadas por meio de *software* de *blend* e *warping*.

O *Plug-in AR* foi desenvolvido utilizando o *SDK* (*Software Development Kit*) fornecido pela *Laminar Research*, empresa produtora do X-Plane. O *SDK* permite que rotinas desenvolvidas por usuários sejam executadas de forma integrada ao *software* X-Plane. Entre as funções do *Plug-in AR* destacam-se: habilitar a comunicação e troca de dados entre o X-Plane

e o Sistema Supervisório *AR*, incluir e posicionar a aeronave Líder no mundo X-Plane, entre outras.

De forma mais detalhada, o *Plug-in AR* executa as seguintes tarefas:

- Criar, no mundo X-Plane, uma aeronave secundária, para o caso em que o treinamento é executado com a aeronave Líder projetada pelo sistema visual do SIVOR.
- Desabilitar uso de rotinas de inteligência artificial do X-Plane para definição da trajetória a ser seguida pela aeronave secundária e desabilitar o uso de modelos aerodinâmicos do X-Plane para definição do comportamento da aeronave secundária, uma vez que seu posicionamento e orientação são definidos externamente ao *Plug-in AR* e ao X-Plane.
- Receber dados externos, correspondentes aos dados para posicionamento e atitude da aeronave Líder no mundo X-Plane. Observa-se que esses dados são provenientes de um voo pré-gravado e são fornecidos ao *Plug-in AR* pelo Sistema Supervisório *AR*. A comunicação entre o *Plug-in AR* e o Sistema Supervisório *AR* é realizada por comunicação *UDP*, garantindo versatilidade ao sistema.
- Processar os dados de posicionamento e atitude para a correta execução do voo, aplicando transformação de coordenadas e correções de posicionamento.
- Atribuir os dados de posicionamento e atitude para a aeronave secundária, de forma a ser possível sua visualização no sistema visual do SIVOR.

O fluxograma da Figura 6-5 ilustra o funcionamento do *Plug-in AR*.

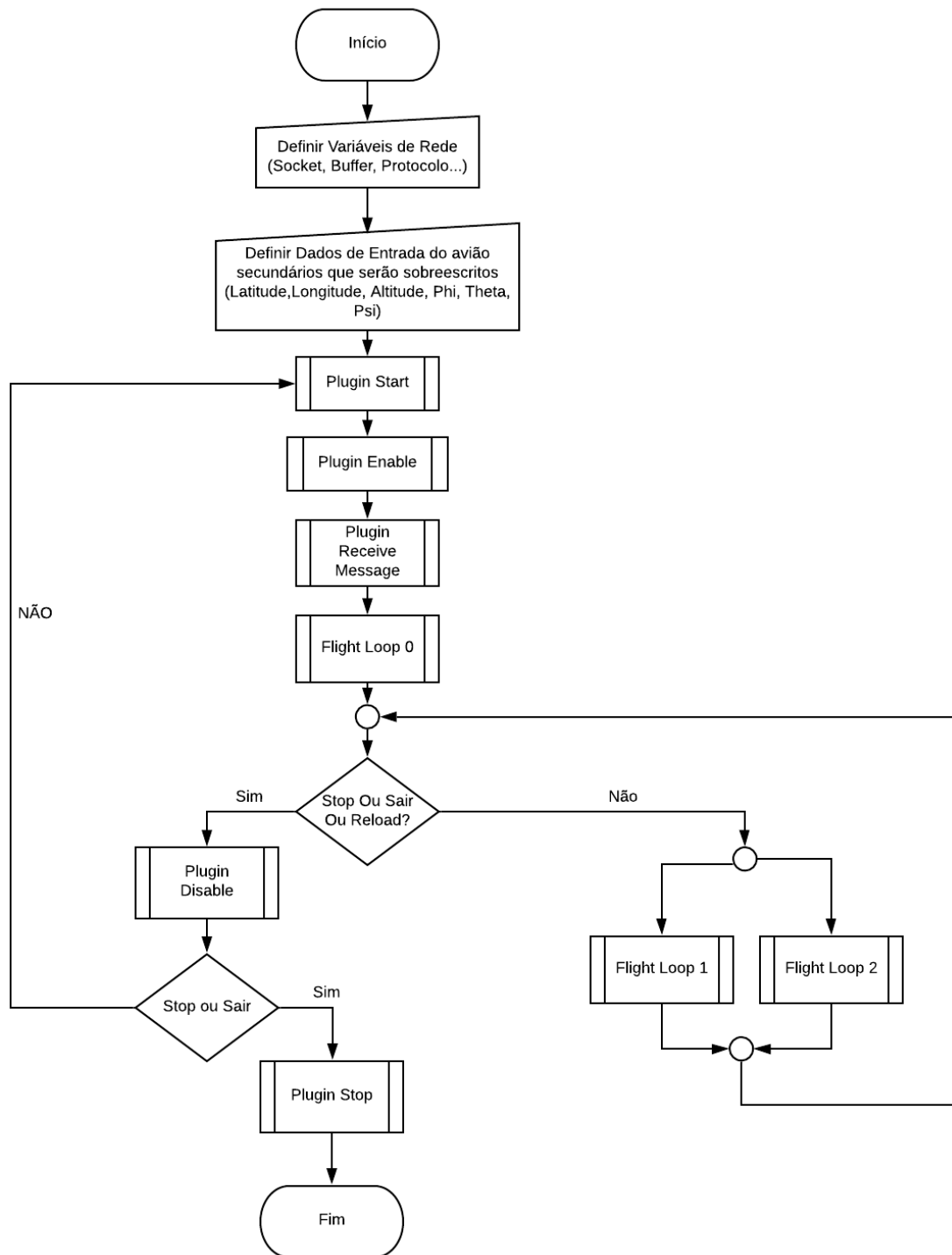


Figura 6-5. Fluxo geral do *Plug-in* de Voo em Formação.

A rotina principal do *Plug-in* AR utiliza 5 funções pré-programadas e disponibilizadas pelo *SDK*, ilustradas na Figura 6-6:

- *Start*: executada apenas na inicialização do sistema, é responsável pelo cadastro das sub-rotinas e bibliotecas utilizadas pelo sistema.
- *Enable*: executada na ativação do gerenciador de *plug-in* do X-Plane, registra e inicializa a comunicação *UDP*.
- *Disable*: executada em casos de desativação do gerenciador de *plug-in* ou quando o X-Plane é desligado. Esta função apenas encerra a comunicação *UDP*.
- *Stop*: executada no desligamento do X-Plane, encerra todas as sub-rotinas em execução.
- *Receive_message*: rotina utilizada para troca de mensagens entre o X-Plane e o *Plug-in AR*.

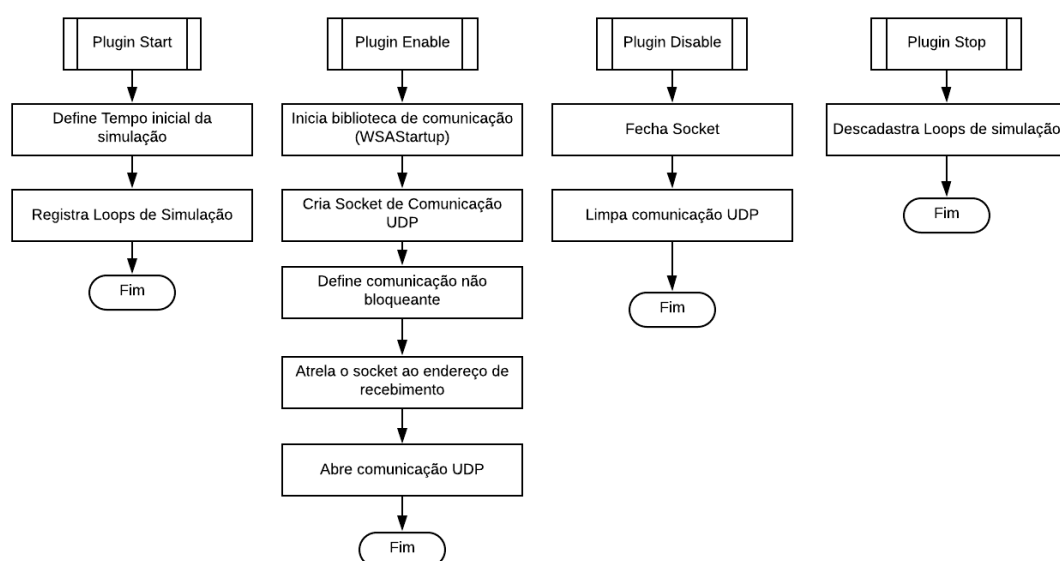


Figura 6-6. Funções nativas do *plug-in* X-Plane.

Além de disponibilizar as funções nativas do X-Plane ilustradas na Figura 6-6, o *SDK* permite ao desenvolvedor definir *flight loops call-backs*, correspondentes a funções executadas de forma contínua durante toda simulação. Esses *loops* são geralmente utilizados para desenhar elementos, interagir com o modelo aeronáutico, executar ações em “tempo real”, entre outros.

Para o *Plug-in AR*, são desenvolvidos 3 *flight loops call-backs*:

- *Flight loop 0* (Figura 6-7): executado apenas 1 vez, utilizado para desabilitar a rotina de inteligência artificial da aeronave secundária e o modelo aerodinâmico.
- *Flight loop 1* (Figura 6-8): executado assim que uma mensagem *UDP* é recebida, atribui o conteúdo da mensagem à uma variável *string* global que pode ser acessada por todo o programa.

- *Flight loop 2* (Figura 6-9): executado a cada 10ms, é responsável por processar a mensagem cadastrada na variável global pelo *loop1*. Executa um processo de separação onde o conteúdo original da *string* que se encontra separado por vírgulas é isolado, submetido a conversão de tipo e de unidade, e aplicado às variáveis do X-Plane que controlam o posicionamento da aeronave secundária.

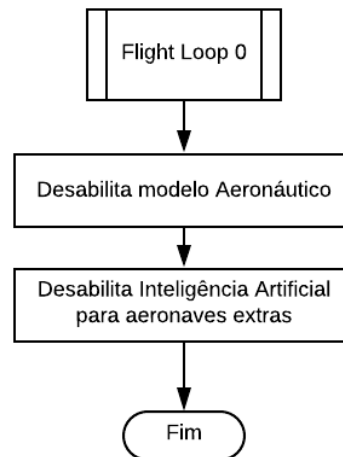


Figura 6-7. *Flight Loop Callback 0*.

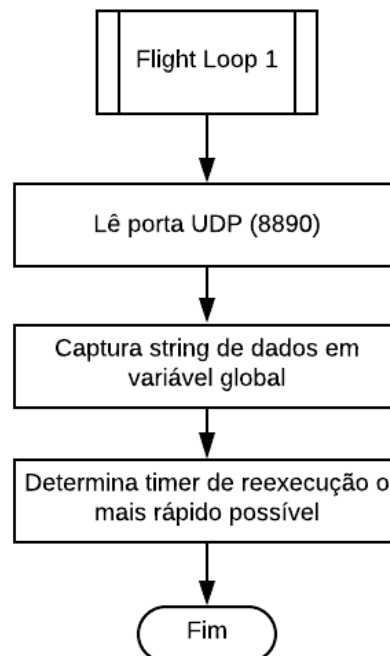


Figura 6-8. *Flight Loop Callback 1*.

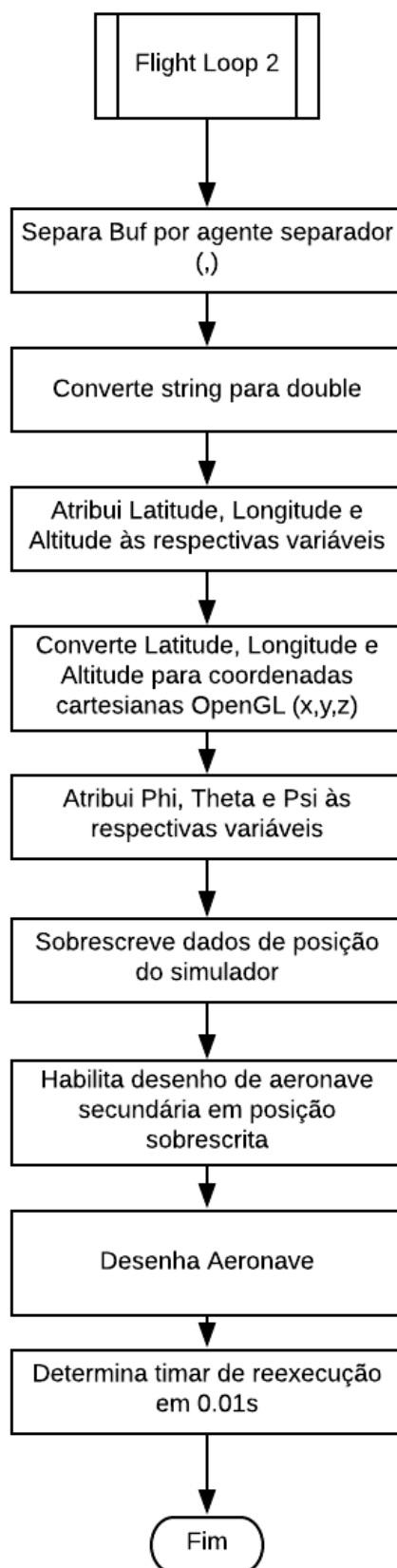


Figura 6-9. *Fliht Loop Callback 2.*

6.3 Sistema Embarcado AR

O Sistema Embarcado AR corresponde a aplicação de realidade aumentada para uso em voo de formatura básica que é embarcada no dispositivo *HoloLens*. Para o desenvolvimento dessa aplicação utiliza-se a plataforma *Unity 3D*, configurada para compilação em plataforma externa do tipo *UWP (Universal Windows Platform)*.

A escolha da plataforma *Unity* é devida a grande disponibilidade de ferramentas, elementos gráficos, funções e material didático aberto, o que permite versatilidade e agilidade na implementação. Além do desenvolvimento de aplicações de realidade aumentada, essa plataforma também é muito utilizada no desenvolvimento de *games* e aplicações de realidade virtual.

O Sistema Embarcado AR tem como principal função permitir ao piloto visualizar a aeronave Líder durante o voo em formação. Para tanto, deve-se definir métodos ou estratégias de implementação para as seguintes tarefas:

- Posicionamento de elementos ativos e passivos; e
- Controle da aeronave virtual e geração de trajetória.

As opções analisadas e selecionadas para cada tarefa são detalhadas na sequência.

6.3.1 Posicionamento de elementos ativos e passivos

O Sistema Embarcado AR deve posicionar, durante a simulação, dois tipos de elementos:

- Elemento ativos ou dinâmicos, correspondem aos objetos que apresentam movimento no ambiente virtual, o mundo *Unity*, tais como câmera, avião Líder, solo, iluminação virtual;
- Elementos passivos ou estáticos: correspondem aos objetos que não se movimentam no mundo *Unity*, como o modelo de oclusão do *cockpit*;

Observa-se que, conforme detalhado na Seção 6.3.2, na implementação do Sistema Embarcado AR, considera-se que o referencial inercial do mundo *Unity* é o *cockpit* da aeronave Ala. Devido ao movimento relativo entre a aeronave Ala e o solo, o solo está em movimento em relação ao referencial inercial e, portanto, é um elemento ativo. Se ao contrário, o referencial inercial estivesse posicionado no solo, a aeronave Ala estaria em movimento e seria um elemento ativo.

Além disso, a aplicação de realidade aumentada deve considerar interação entre objetos reais e virtuais. Em particular, destaca-se a necessidade de rotinas de oclusão para garantia de uma maior fidelidade da simulação. Essas rotinas são responsáveis, por exemplo, por não permitir a visualização das partes da aeronave Líder que apareceriam sobre o painel do *cockpit*, conforme ilustrado na Figura 6-10, provendo ao usuário uma ideia de profundidade e aumentando o realismo da simulação.

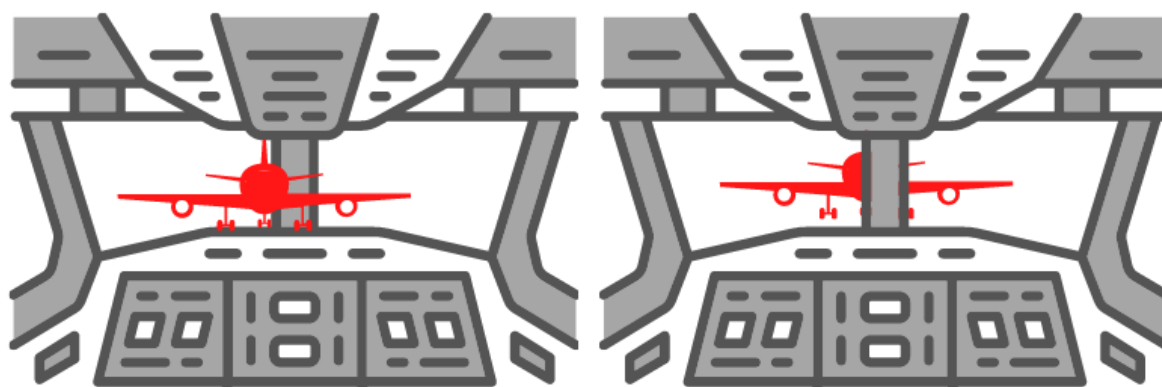


Figura 6-10. Visualização da aeronave Líder sem (à direita) e com (à esquerda) oclusão da aeronave pelo *cockpit*.

Para realizar a projeção dos elementos ativos e passivos, é necessário definir a posição do piloto, que está usando os óculos de realidade aumentada, no mundo *Unity*. O elemento correspondente ao piloto no mundo *Unity* é a câmera. Os três métodos mais comuns para resolver essa questão são:

- **Posicionamento padrão:** o mundo *Unity*, por definição, utiliza a posição dos óculos no momento de início da aplicação como origem ou ponto 0 do referencial inercial do mundo *Unity*, fixando a direção do vetor gravidade como o eixo z da simulação. A partir desse momento, a atualização da posição dos óculos, isto é, da cabeça do piloto, é realizada com base nos dados dos sensores inerciais presentes nos óculos.
- **Reconhecimento ambiental:** os sensores do *HoloLens* realizam um mapeamento do ambiente que resulta na identificação de entidades como planos horizontais, planos verticais, cilindros, cones, entre outros (Figura 6-11). Essas entidades são usadas para criar um modelo 3D do ambiente. Os hologramas são, então, posicionados em relação a algum elemento real identificado.

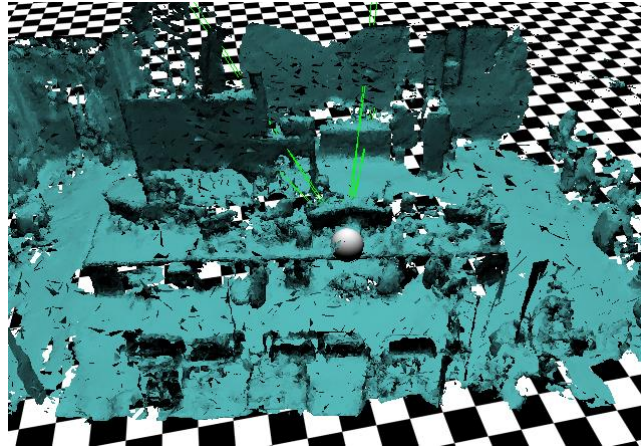


Figura 6-11. *Spatial awareness* do *Hololens*.

- **Reconhecimento de marcadores:** consiste na identificação de imagens pré-programadas utilizando a câmera dos óculos e rotinas de reconhecimento de padrões. Após a identificação do marcador, calcula-se a posição relativa entre ele e os óculos para definir a posição do referencial inercial do mundo *Unity*. Na Figura 6-12, um robô é localizado em relação ao *QR Code*. Os traços verdes são inseridos para indicar a imagem reconhecida e utilizada no posicionamento da origem do sistema inercial do mundo *Unity*.



Figura 6-12. Uso de marcador *Vuforia*.

- **Calibração manual:** o *Hololens*, como qualquer outro console, permite o uso de entradas fornecidas pelo usuário para ajustar manualmente o posicionamento dos óculos no mundo *Unity*.

Para o desenvolvimento do Sistema Embarcado AR, testou-se, inicialmente, o método de reconhecimento de marcadores, devido à sua simplicidade de implementação. Utilizou-se o aplicativo *Vuforia* para programar a imagem alvo, um *QR code* (Figura 6-13), posicionado a 42 metros da aeronave Líder (Figura 6-14). Essa distância corresponde à medida padrão de ‘2 aeronaves’ utilizada como referência para o voo em formatura (aeronave padrão tem 21m de comprimento). Quando o *QR code* é reconhecido, atribui-se sua posição à câmera, isto é, aos óculos (Figura 6-15). A sobreposição correspondente da imagem da aeronave ao mundo real, isto é, a visualização da aeronave Líder a partir do *cockpit* do SIVOR, é apresentada na Figura 6-16, para voo nivelado, e na Figura 6-17, para voo em curva.

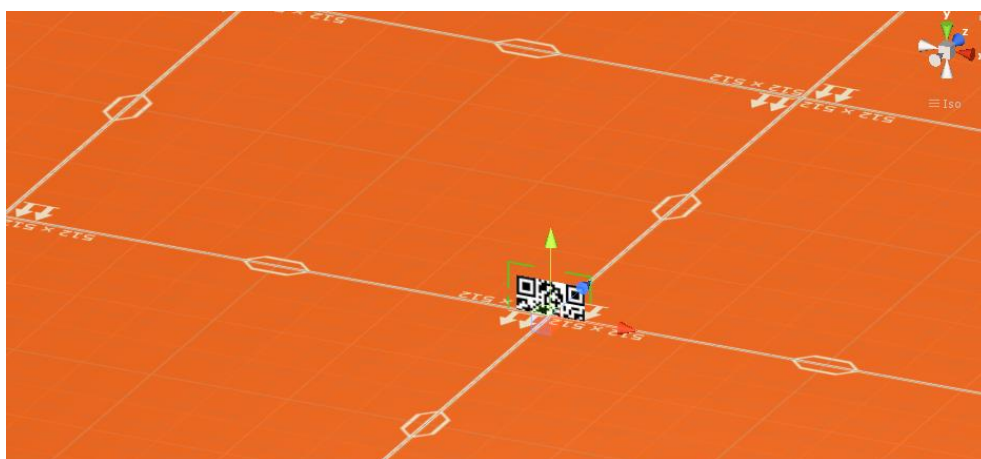


Figura 6-13. Imagem alvo do *Vuforia*.

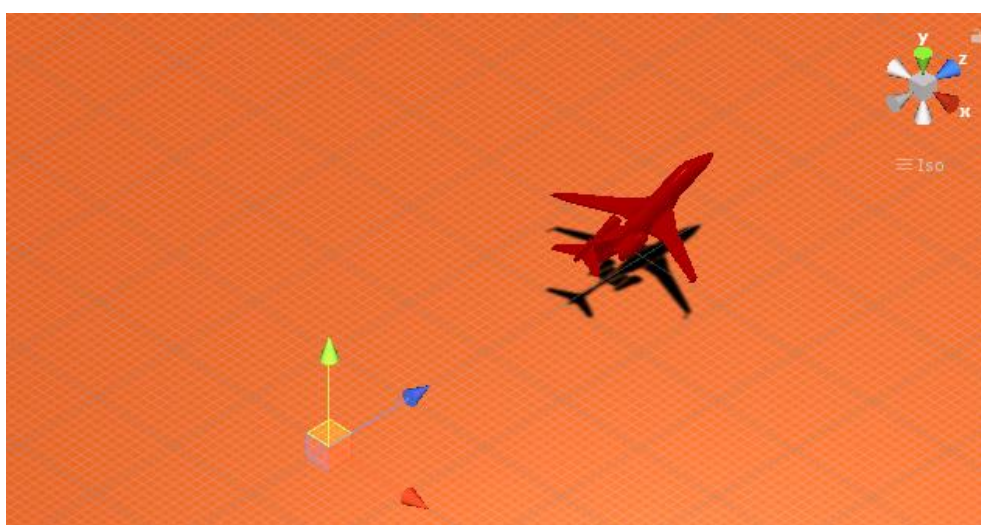


Figura 6-14. Avião localizado no *Unity*.

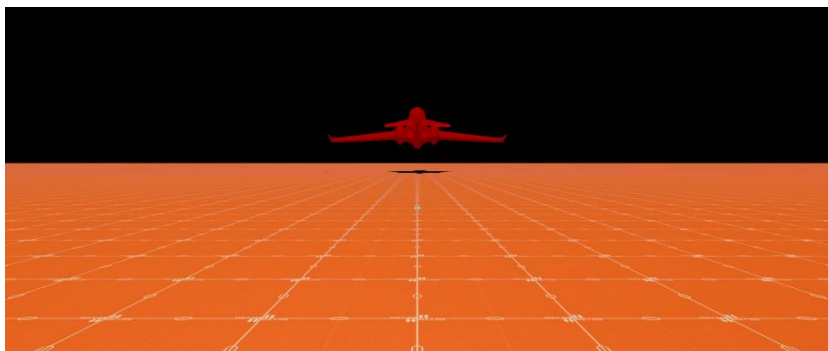


Figura 6-15. Ponto de vista da câmera *Unity*.

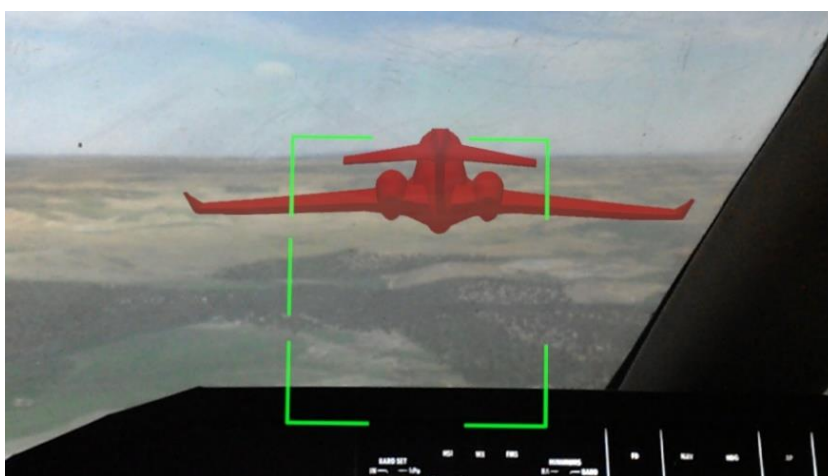


Figura 6-16. Avião de realidade aumentada em formação nivelado.

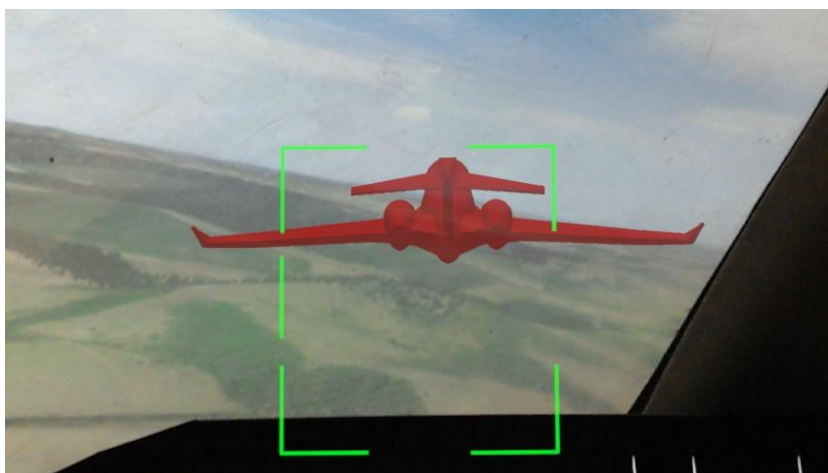


Figura 6-17. Avião de realidade aumentada em formação em curva.

Após alguns testes, decidiu-se não utilizar o método de reconhecimento de imagens pelos seguintes motivos:

- O sistema tem alta latência e modificações abruptas do posicionamento da aeronave Líder ocorrem frequentemente durante o voo;
- O ambiente escuro do cockpit e a baixa resolução da câmera dos óculos fazem com que o reconhecimento do *QR code* seja muito instável;
- O alto consumo de energia da câmera do *HoloLens*, que deve permanecer ligada constantemente, diminui o tempo de duração da bateria, o que poderia impossibilitar um treinamento mais longo.

A abordagem de posicionamento baseada no reconhecimento de ambiente também foi descartada após alguns testes devido à dificuldade de detecção de elementos em um ambiente tão restrito como o interior do *cockpit*. Além disso o uso desta funcionalidade para a oclusão também acaba sendo inviável devido a variações grandes na malha 3D identificada, o que acaba interferindo de forma significativa na fluidez da projeção da aeronave Líder.

Como solução final para o posicionamento dos elementos, adota-se uma abordagem híbrida que combina o posicionamento padrão com calibração manual. Essa abordagem parte de um posicionamento padrão inicial, correspondente, aproximadamente, à posição da cabeça do piloto no *cockpit*. Em seguida, realiza-se uma calibração baseada em comandos direcionais e de orientação que o piloto pode fornecer ao *HoloLens* via um teclado *bluetooth*.

Para etapa de calibração e posteriormente, para oclusão, criou-se um modelo 3D do *cockpit* no mundo *Unity* a ser utilizado como máscara. Esse modelo foi obtido a partir do escaneamento da parte interna do simulador de voo, posteriormente ajustado para formar um modelo leve e mais fiel a realidade. As etapas de criação do modelo 3D do *cockpit* são ilustradas Figura 6-18. A Figura 6-19 apresenta o *cockpit* da perspectiva do piloto.

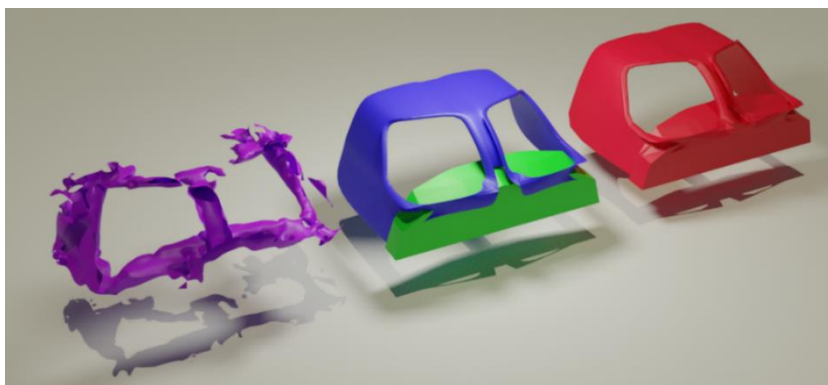


Figura 6-18. Da esquerda para direita: modelo escanado, modelo composto por peças separadas de console e *cockpit*; modelo 3D final.



Figura 6-19. *Cockpit* da perspectiva do piloto.

Na elaboração do Sistema Embarcado AR, todos os objetos presentes no mundo *Unity* são organizados de forma hierárquica como ‘objetos filhos’ de um único ‘objeto pai’ denominado ‘Universo AR’. Numa relação hierárquica desse tipo, quando o ‘objeto pai’ tem sua posição ou orientação alterada, o mesmo ocorre com os ‘objetos filhos’, de tal forma a manter inalterado o posicionamento relativo entre ‘objetos filhos’ e ‘objeto pai’. Já quando o ‘objeto filho’ é movimentado, a posição e orientação do ‘objeto pai’ permanece inalterada. Um exemplo é apresentado na Figura 6-20, onde o cubo azul é ‘pai’ do cubo vermelho. Quando uma operação de rotação é aplicada ao cubo azul, ambos os cubos são reposicionados. Quando a mesma operação é aplicada ao cubo vermelho, apenas ele se move.

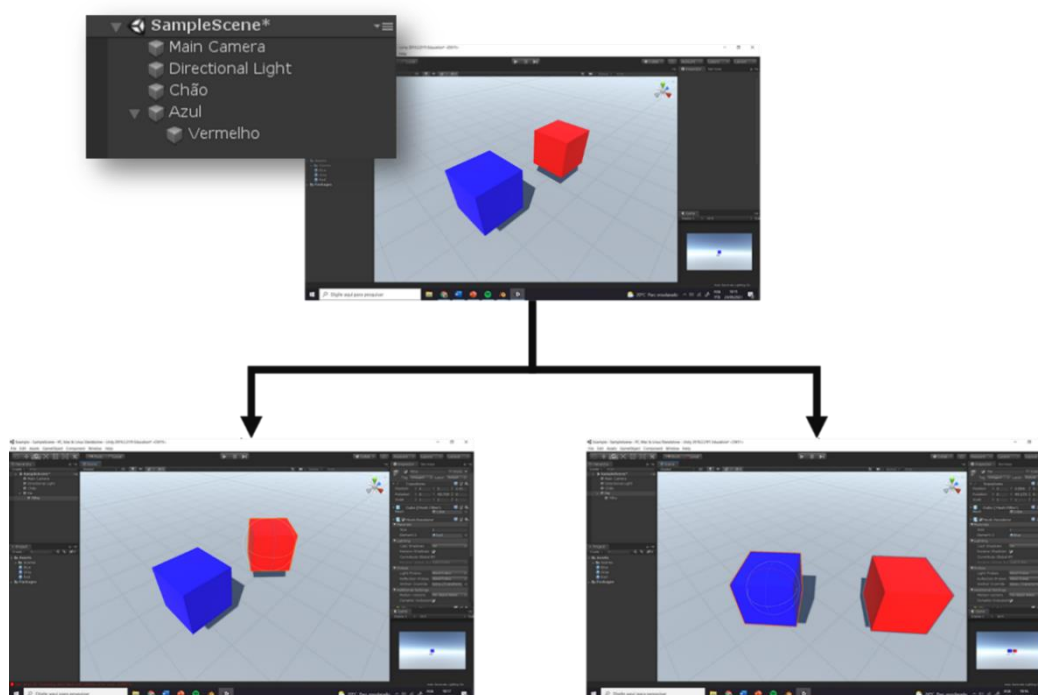


Figura 6-20. Movimentação de elementos com relação hierárquica no mundo *Unity*.

Uma vez que o piloto se encontra no *cockpit* do simulador SIVOR, o Sistema Embarcado AR é inicializado e executa a rotina de calibração, ilustrada no fluxograma da Figura 6-21.

O referencial inercial é atribuído à posição atual do *HoloLens* e todos os elementos que compõem o mundo *Unity* são posicionados numa posição aproximada. O piloto passa a enxergar o modelo 3D do *cockpit* na cor vermelha, próximo de sua posição final. Utilizando um teclado conectado ao sistema por *bluetooth* e os comandos apresentados na Tabela 6-1, o piloto consegue fazer pequenos ajustes na posição do “Universo AR” e, consequentemente, movimentar todos os elementos do mundo virtual. Ele é instruído para seguir nesse processo até que o *cockpit* virtual vermelho se sobreponha perfeitamente ao *cockpit* real do SIVOR, corrigindo a posição relativa entre o mundo real e o mundo virtual. A Figura 6-22 e a Figura 6-23 ilustram o modelo virtual do *cockpit* (em vermelho) se sobrepondo ao *cockpit* real, durante o processo de calibração manual. Para finalizar, a cor do *cockpit* é alterada para preto e passa a funcionar como máscara de oclusão. Concluída a calibração, o piloto e o sistema estão prontos para iniciar o treinamento do voo em formação.

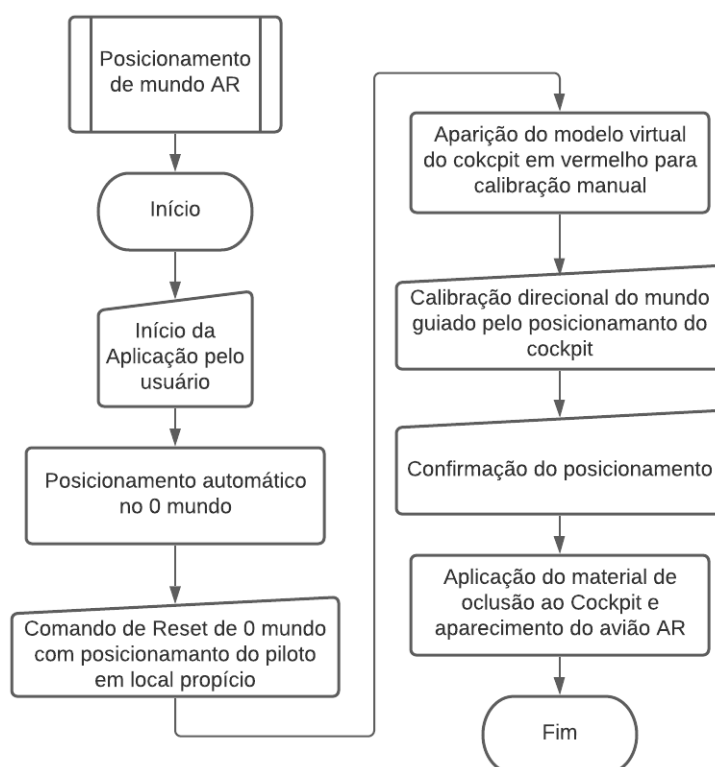


Figura 6-21. Fluxograma da rotina de calibração.

Tabela 6-1. Comandos de teclado para ajuste fino.

Comando	Ação
↑	<i>Deslocar cockpit para cima</i>
↓	<i>Deslocar cockpit para baixo</i>
→	<i>Deslocar cockpit para a direita</i>
←	<i>Deslocar cockpit para a esquerda</i>
F	<i>Deslocar cockpit para frente</i>
T	<i>Deslocar cockpit para trás</i>
4	<i>Alternar liberação das movimentações</i>
5	<i>Alternar cor do cockpit (vermelho/material de oclusão)</i>
R	<i>Reset de posição</i>

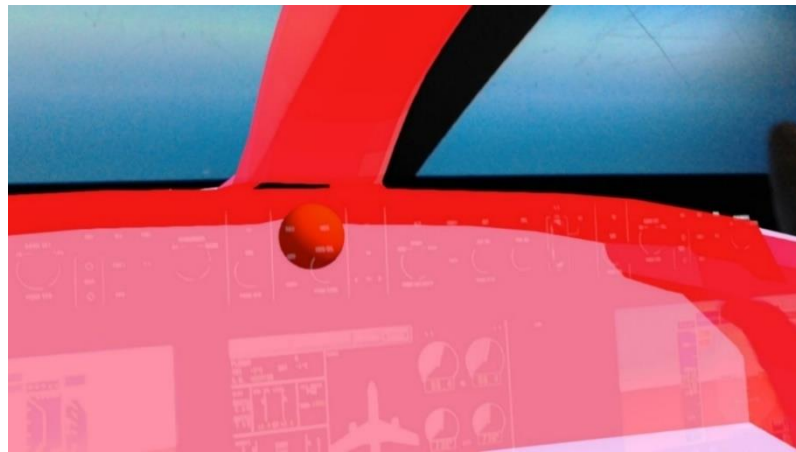


Figura 6-22. Coluna central do modelo virtual do *cockpit* (vermelho) se sobrepondo ao *cockpit* real.

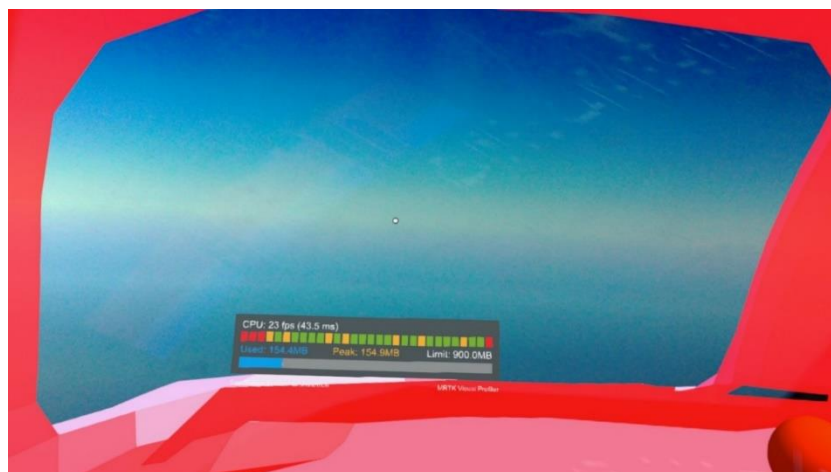


Figura 6-23. Janela do modelo virtual do *cockpit* (vermelho) se sobrepondo ao *cockpit* real.

A próxima seção apresenta a abordagem utilizada para movimentar o holograma da aeronave Líder durante o treinamento do voo em formatura básica.

6.3.2 Controle da aeronave Líder e geração de trajetória

Quando se inicia uma nova aplicação no *Unity*, o mundo *Unity* é criado com dois objetos iniciais: uma câmera e a iluminação ambiental. O programador pode então adicionar novos objetos 3D, objetos vazios, gerenciadores de áudio, entre outros elementos. A maioria dos elementos presentes no mundo *Unity* tem seu próprio sistema de coordenadas. Além disso, pode-se estabelecer relações hierárquicas entre os objetos que afetam a sua movimentação, conforme ilustrado anteriormente.

Numa aplicação de realidade aumentada, a câmera presente no mundo *Unity* é atrelada aos sensores que capturam a movimentação do usuário. A posição e a orientação da câmera no mundo *Unity* são atualizadas automaticamente, conforme o usuário se movimenta, garantindo a atualização da imagem projetada. A manipulação via código da posição da câmera não é uma prática recomendada, pois acaba se sobrepondo aos comandos oriundos dos óculos de realidade aumentada.

Uma primeira abordagem testada para movimentação da aeronave Líder consistia em receber os dados de posição e atitude da aeronave Ala, provenientes do modelo aerodinâmico do simulador SIVOR, e da aeronave Líder, proveniente do arquivo de *playback*, para então executar uma transformação de coordenadas para definir a posição e orientação da aeronave Líder no sistema de coordenadas atrelado à aeronave Ala. Desta forma, o comportamento resultante para a aeronave Líder é aquele de um voo a frente do Ala, conforme ilustrado na Figura 6-24.

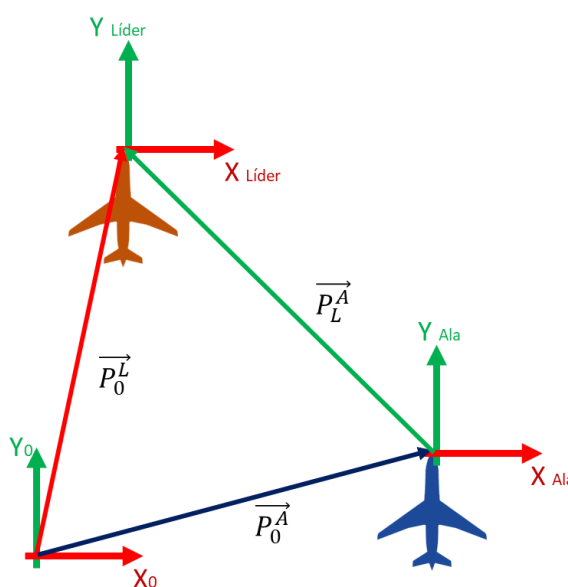


Figura 6-24. Transformação de coordenadas para posicionamento relativo da aeronave Líder.

Esta abordagem foi implementada no Sistema Supervisório AR, que enviava as coordenadas da aeronave Líder já transformadas para o Sistema Embarcado AR do *HoloLens*. Observou-se, no entanto, que esta solução apresenta uma latência significativa devido aos cálculos necessários. Além disso, essa abordagem também dificultou a realização de testes pois não é possível testar a movimentação da aeronave Líder de forma desacoplada da aeronave Ala.

Como abordagem alternativa, adotou-se uma filosofia de movimentação comum na programação de *games*, baseada no uso de hierarquias. Nessa solução, a posição e a rotação da câmera em relação ao Universo AR não é alterada pelo programa, mas apenas controlada pelo *HoloLens*. Como elemento filho do Universo AR, criou-se o Mundo AR, correspondente ao solo. Ao invés do Mundo AR permanecer fixo e a aeronave Ala se deslocar em relação a ele, a aeronave permanece fixa e o Mundo AR se move na direção contrária ao voo da aeronave. A aeronave Líder foi definida como filha do Mundo AR. Quando o Mundo AR se move em relação a aeronave Ala, a aeronave Líder também se move, atualizando automaticamente sua posição em relação a aeronave Ala.

O mundo virtual no *Unity* é composto então pelos seguintes elementos:

- Universo AR: objeto vazio responsável por ser um invólucro para todos os elementos do ambiente virtual exceto a câmera;
 - Mundo AR: objeto vazio responsável por ser o invólucro de todo o mundo móvel;
 - Mundo rotacional: objeto vazio responsável por executar as rotações invertidas da aeronave Ala;
 - Mundo Translacional: objeto vazio responsável por executar as translações invertidas da aeronave Ala;
 - Aeronave Líder: objeto 3D responsável por executar translações e rotações da aeronave Líder;
 - *Cockpit*: objeto 3D com formato do *cockpit* que funciona como máscara de oclusão para o Sistema Embarcado AR;
 - Câmera: representa a posição da cabeça do piloto no mundo *Unity*.

Para manter o posicionamento consistente entre os objetos, as operações que o Mundo AR executa correspondem às operações que a aeronave Ala realizaria, mas com o sinal invertido, conforme exemplificado na Figura 6-25.

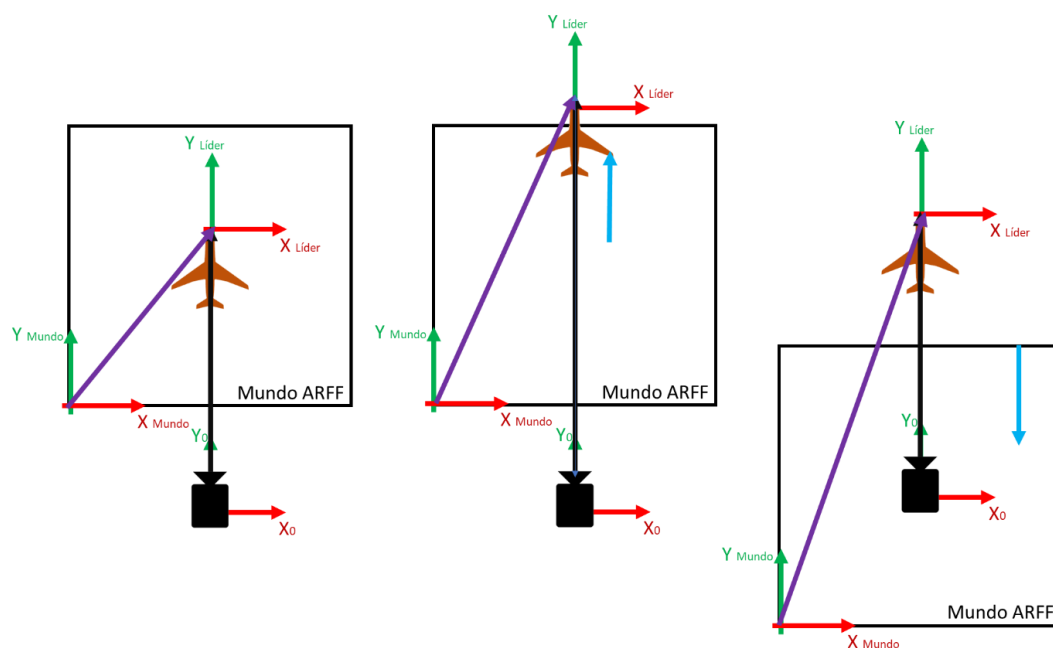


Figura 6-25. Sistema de movimentação baseado em hierarquia.

Na figura da esquerda, o avião Líder a câmera e o mundo estão parados. Na figura central, simula-se o movimento do avião Líder por 100m, com o avião Ala parado. Neste caso, o mundo mantém sua posição, da perspectiva da câmera, o Líder avança. Na sequência, simula-se uma situação onde o Líder, após o avanço para e o avião Ala avança 100m. Como o avião Líder é ‘filho’ do Mundo AR, quando o Mundo AR se move, o Líder acompanha este movimento. Dessa forma, implementando o avanço do Ala de forma invertida, gera-se a perspectiva para o piloto de uma aproximação dos dois aviões. Esta lógica é implementada tanto na translação quanto na rotação. Os resultados obtidos indicam uma latência menor do que a primeira abordagem implementada, além de uma maior facilidade para execução de testes.

Observa-se que a abordagem de movimentação retrógrada do cenário com entidades hierárquicas atreladas a ele é comumente utilizada em jogos, pois diminui consideravelmente a carga computacional associada a renderização e geração de cenário. Nesse caso, o movimento não é do jogador, mas sim do mundo. O jogador permanece estático no mesmo ponto, enquanto o cenário é movido de forma invertida, gerando a perspectiva de movimento progressivo do jogador estático. Alguns exemplos de aplicações que utilizam esta técnica são: *T-Rex Chrome run*, *Flappy Bird*, *Temple Run*, entre outros.

6.4 Sistema Supervisório AR

Para integrar e sincronizar a troca de dados entre o Sistema Embarcado AR e os demais componentes do simulador SIVOR, foi desenvolvido um sistema supervisor em *LabView*, com as seguintes funções:

- Comunicar-se com o sistema SECT da EMBRAER e receber dados de:
 - Comandos dos *inceptors* dentro do *cockpit*;
 - Posicionamento imediato da aeronave Ala;
- Comunicar-se via *UDP* com o *Plug-in AR*, criado no X-Plane, e enviar dados de posicionamento do Ala e do Líder;
- Comunicar-se via *UDP* com os óculos *HoloLens* e enviar dados de posicionamento do Ala e do Líder;
- Coletar dados de voo provenientes do sistema SECT;
- Executar arquivo de *playback* de voo gravado representando o voo padrão da aeronave Líder;
- Gravar dados de um novo *playback*;
- Gerenciar via interface gráfica o voo em formação, permitindo ao controlador do voo atualizar a posição das aeronaves, ligar e desligar a formação e reiniciar o sistema.

A interface gráfica do Sistema Supervisório AR é apresentada na Figura 6-26.

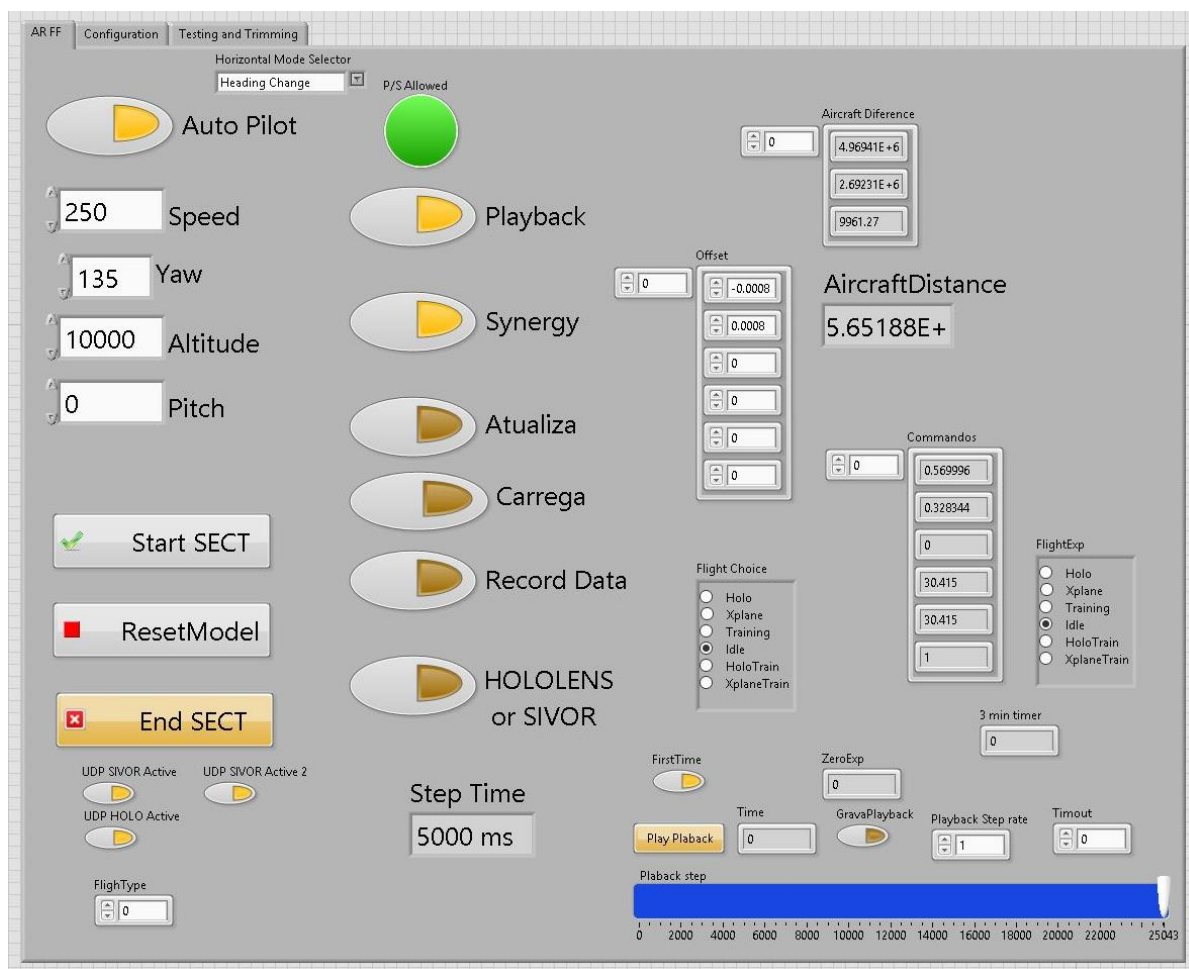


Figura 6-26. Interface do Sistema Supervisorio AR.

A Figura 6-27 apresenta duas fotos do treinamento de voo em formação sendo executado com a aeronave Líder projetada pelo sistema visual do simulador SIVOR. A Figura 6-28 apresenta o voo em formação com aeronave Líder projetada em realidade aumentada. Já na Figura 6-29, apresenta-se a aeronave Líder projetada pelo sistema de realidade aumentada ao lado da aeronave Líder projetada pelo sistema visual.



Figura 6-27. Voo em formação sem uso de realidade aumentada.



Figura 6-28. Voo em formação com aeronave Líder projetada em realidade aumentada.



Figura 6-29. Avião projetado em realidade aumentada pareado com avião do simulador.

6.5 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou o desenvolvimento de um protótipo do tipo prova de conceito de um sistema de treinamento de voo em formação usando realidade aumentada. O sistema foi desenvolvido e integrado ao simulador SIVOR e foi concebido para permitir realizar comparações entre os casos em que a aeronave Líder é projetada pelo sistema de realidade aumentada e pelo sistema visual do SIVOR.

O objetivo do protótipo é permitir a realização de experimentos para análise do impacto sobre o piloto do uso de realidade aumentada no treinamento do voo em formatura básica.

No próximo capítulo, apresenta-se a proposta de uma campanha de experimentos, onde o comportamento da aeronave Líder é obtido a partir de um voo pré-gravado em arquivo de *playback*, de forma a poder ser repetido inúmeras vezes.

No entanto, observa-se que o sistema foi projetado para permitir que esse comportamento seja definido de diferentes formas, como por exemplo num voo *multiplayer* onde um segundo piloto é adicionado à simulação ou ainda utilizando rotinas de inteligência artificial externas para definir a trajetória da aeronave Líder.

Desta forma, salienta-se que o sistema desenvolvido é uma das contribuições desta tese, podendo ainda ser utilizado em experimentos futuros.

7 Análise Experimental

Este capítulo inicia-se com a seleção de um conjunto de métricas para avaliação do efeito sobre o piloto da substituição da aeronave Líder real por uma aeronave Líder projetada por sistema de realidade aumentada, em um voo de treinamento de formatura básica.

Na sequência, propõe-se um projeto de experimento a ser executado utilizando o protótipo de sistema de realidade aumentada descrito no Capítulo 6 e o conjunto de métricas definidos. Para melhor entendimento das análises estatísticas propostas, um breve resumo sobre os métodos estatísticos utilizados é exposto no Apêndice 1.

7.1 Seleção de Fatores e Métricas de Análise

Para definir um conjunto de métricas para análise do efeito sobre o piloto do uso de realidade aumentada para treinamento de voo em formação, utiliza-se como ponto de partida o modelo proposto por Endsley e apresentado na Seção 3.1. Este modelo é reproduzido na Figura 7-1, agora omitindo-se as etapas referentes aos níveis de consciência situacional, decisão e ação e salientando-se os fatores que influenciam o comportamento do ser humano.

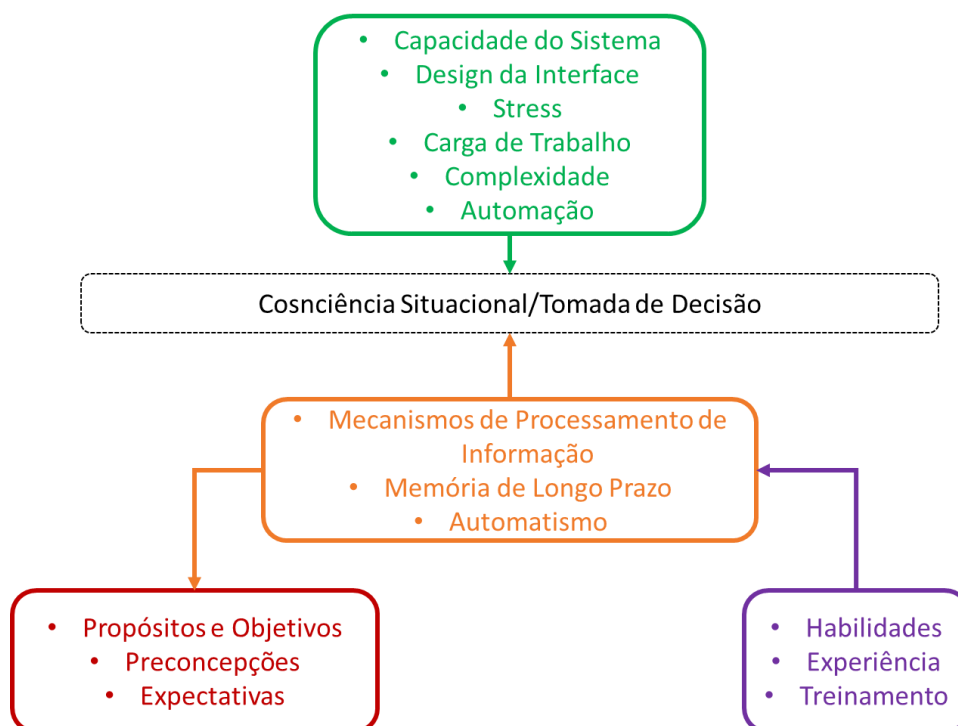


Figura 7-1. Fatores de influência no comportamento humano, de acordo com modelo proposto por Endsley (1995) adaptado pelo autor.

Os fatores identificados por Endsley, quando aplicados ao treinamento de voo em formação utilizando um sistema de realidade aumentada, podem ser instanciados conforme exemplificado a seguir:

- Capacidade do sistema: corresponde a características como taxa de atualização da projeção em realidade aumentada, tempo de processamento para determinação da posição da aeronave Líder, campo de visão do sistema de realidade aumentada, precisão da oclusão, entre outras.
- *Design* da interface: corresponde as características da imagem projetada (ex.: brilho, cor), aos comandos disponibilizados pelo sistema para calibração e configuração do treinamento, entre outras coisas.
- *Stress*: fator sentido pelo piloto durante o treinamento de voo em formação, que pode ser influenciado pela tarefa em execução e pelo sistema de realidade aumentada.
- Carga de trabalho: percepção do piloto sobre a intensidade da carga de trabalho associada a situação de treinamento e a interface de realidade aumentada utilizada.
- Complexidade do sistema: fator decorrente da complexidade do algoritmo para cálculo da posição relativa entre aeronaves Líder e Ala e de outras funcionalidades que podem ser embarcadas no sistema de realidade aumentada.
- Automação do sistema: fator decorrente das funcionalidades que podem ser oferecidas pelo sistema, tais como a geração da trajetória da aeronave Líder de forma automática, capacidade de detecção automática de falhas ou situações perigosas, alteração ou ajuste automático da dificuldade do treinamento.
- Mecanismos de processamento da informação: se refere aos recursos cognitivos utilizados pelo piloto para processamento da imagem e compreensão do comportamento da aeronave Líder.
- Automatismo: se refere ao comportamento automático por parte do piloto durante a execução da tarefa de voo em formação.
- Memória de longo prazo: fator associado ao histórico de experiências do piloto, que pode ser utilizado como recurso para compreensão da situação e definição da ação a ser tomada.
- Habilidades: fator referente a características do piloto que podem ser utilizadas durante a execução da tarefa do voo em formação, tais como habilidade de controlar a aeronave, capacidade de manter a calma em situação de pressão, entre outras.
- Experiência: fator associado ao histórico de experiências do piloto em tarefas semelhantes ou com sistemas semelhantes.

- Treinamento: realização de treinamentos anteriores da tarefa em execução, isto é, de voos em formação, seja em simuladores de voo, seja em voos reais.
- Propósitos e objetivos: no caso do treinamento de voo em formação o objetivo do piloto é manter a configuração da formação com segurança.
- Preconcepções: no caso do uso de realidade aumentada, um exemplo de preconcepção é a falta ou excesso de confiança no sistema.
- Expectativas: expectativa do piloto quanto ao seu próprio desempenho, quanto ao comportamento da aeronave Líder, quanto ao treinamento, entre outras.

A partir da Figura 7-1, constrói-se a Tabela 7-1, onde listam-se os fatores identificados por Endsley em seu modelo. Avalia-se então cada um dos fatores quanto aos seguintes itens, representados como colunas na tabela em questão:

- Tarefa: o fator depende da tarefa em execução;
- Operador: o fator depende da capacidade do ser humano;
- Sistema: o fator está relacionado as características da(s) máquina(s) em uso.

Tabela 7-1. Potenciais fatores de análise.

Fatores	Operador	Tarefa	Sistema
Capacidade do sistema		✓	✓
Design da interface		✓	✓
Stress	✓	✓	✓
Carga de trabalho	✓	✓	✓
Complexidade do sistema			✓
Automação do sistema			✓
Mecanismos de processamento da informação	✓		
Automatismos	✓	✓	✓
Memória de longo prazo	✓		
Habilidades	✓	✓	
Experiência	✓	✓	✓
Treinamento	✓	✓	✓
Propósitos e objetivos	✓	✓	
Preconceitos	✓	✓	
Expectativas	✓	✓	

Da lista apresentada, selecionam-se os fatores relativos simultaneamente ao operador, a tarefa e ao sistema evidenciados em cinza. Para esta lista Tabela 7-2, composta de cinco fatores, avalia-se então a dinâmica do fator, considerada aqui como a capacidade do fator ser afetado e estimado ao longo de experimentos de curta duração, que sejam factíveis como parte de uma campanha de experimentos realizada no contexto desta tese.

Tabela 7-2. Dinâmica dos fatores em análise.

Fatores	Dinâmica
Stress	Alta
Carga de trabalho	Alta
Automatismos	Baixa
Experiência	Média
Treinamento	Média

Apesar da relevância do fator automatismo, a análise da dinâmica do fator resulta no descarte do mesmo, dado a necessidade de experimentos com duração de semanas ou até mesmo meses para gerar comportamentos associados a respostas automáticas por parte do piloto. Nesta tese, avaliam-se, portanto, stress, carga de trabalho, experiência e treinamento como fatores relativos ao piloto que podem ser afetados pelo sistema de realidade aumentada. Observa-se ainda que experiência e treinamento, no caso da tarefa de treinamento de voo em formação, são dois fatores que se confundem, uma vez que o treinamento é parte da experiência do piloto com a tarefa e o sistema.

A seguir discutem-se e selecionam as métricas para avaliar a influência do sistema de realidade aumentada nos fatores selecionados.

7.1.1 Experiência e treinamento

Para avaliação do efeito do sistema de realidade aumentada no treinamento e na experiência adquiridos pelo piloto quando realizando um voo em formação, utiliza-se como métrica a performance na execução do voo em formação e sua evolução ao longo do tempo.

Usualmente, a avaliação de cadetes no treinamento do voo em formação é realizada por um instrutor que determina graus de proficiência na execução da manobra. Em geral, as campanhas de treinamento são extensas e possuem inúmeros detalhes a serem analisados durante todo o período de formação do piloto.

Devido a subjetividade da avaliação realizada por instrutores e a dificuldade de se conseguir instrutores para participação em experimentos, aliados a ampla disponibilidade de dados no ambiente de simulação, optou-se pelo uso das seguintes métricas objetivas de performance:

- Posicionamento relativo das aeronaves Líder e Ala.
- Variância do posicionamento relativo, calculada no intervalo de tempo.
- Período de tempo em que o piloto mantém o posicionamento relativo dentro da tolerância especificada como aceitável.

Espera-se que a performance do piloto num voo em formação com aeronave Líder real seja equivalente a performance num voo em formação com aeronave Líder virtual.

A transferência de treinamento, denotada neste trabalho pelo acrônimo *ToT* do termo correspondente em inglês (*Transfer of Training*) pode ser definida como a capacidade de um determinado treinamento se converter em aumento de performance (BLUME, FORD, *et al.*, 2010). Considerando essa definição, as métricas de performance apresentadas são usadas também para avaliar o treinamento por meio da comparação das medidas no início e ao final de um período de treinamento.

De forma semelhante à performance, espera-se que a transferência de treinamento num voo em formação com aeronave Líder real seja equivalente à transferência de treinamento num voo em formação com aeronave Líder virtual.

Observa-se que as métricas propostas, apesar de não corresponderem ao procedimento usual de avaliação em um cenário real de treinamento militar, trazem objetividade e simplicidade à análise, podendo ser complementadas no futuro de acordo com as características das manobras e situações às quais o piloto é submetido durante o treinamento.

7.1.2 Carga de trabalho

A carga de trabalho está relacionada a capacidade de um ser humano executar tarefas designadas dentro de um período temporal definido. A carga de trabalho é afetada pelas características da interface homem-máquina (IHM) dos sistemas utilizados. Além disso, altas cargas de trabalho são associadas a sistemas complexos, falta de treinamento, situações não corriqueiras, entre outros.

Entre os diversos métodos disponíveis para avaliação da carga de trabalho, esta tese opta pelo uso de questionários subjetivos baseados na avaliação do próprio operador quanto ao nível

da dificuldade de realização da tarefa, devido a simplicidade de aplicação. O questionário selecionado foi o *NASA-TLX* (HART e STAVELAND, 1988), já apresentado na Seção 3.2.2.

Nesta tese, utiliza-se uma versão online do questionário *NASA-TLX*, que permite ainda uma classificação binária entre os fatores para determinar pesos para cada um deles.

Espera-se que a carga de trabalho num voo em formação com aeronave Líder real seja equivalente à carga de trabalho num voo em formação com aeronave Líder virtual. No entanto, se a visualização da aeronave no sistema de realidade aumentada trazer uma dificuldade adicional à tarefa, podem ser observadas diferenças.

7.1.3 *Stress*

O termo *stress* foi cunhado por Hans Selye, nos anos 1920 para descrever uma tensão não específica provocada por irregularidades em funções corporais normais (SELYE, 1950). Sofia Lupien, pesquisadora do Centro de Estudos de Stress Humano, utiliza o acrônimo *N.U.T.S.* para classificar eventos estressores mais comuns: novidade (*novelty*), imprevisibilidade (*unpredictability*), ameaça ao ego (*threat to the ego*) e sentimento de controle (*sense of control*) (CSHS CENTRE FOR STUDIES ON HUMAN STRESS, 2020).

Invariavelmente, o *stress* humano resulta numa resposta fisiológica do corpo humano ao evento estressor, ativando, por meio do sistema nervoso simpático, o estado de “luta e fuga”. Tal estado é caracterizado por diversos fenômenos fisiológicos que reorganizam a distribuição e energia do corpo para responder de forma eficaz a determinadas situações (MCCARTY, 2016).

Entre estas reações fisiológicas podemos destacar: aumento na frequência cardíaca, aumento de oxigenação, aumento na taxa respiratória, modificação na liberação de suor e saliva, entre outros (MCCARTY, 2016).

Durante um voo de formação, existe um estado de tensão e atenção constantes, conforme ilustrado na análise de dados apresentada no Capítulo 5. Desta forma, pode-se entender a tarefa como um estressor estimulado pelo sentimento de controle, resultando em níveis de *stress* significativos.

Espera-se que o *stress* num voo em formação com aeronave Líder real seja equivalente ao *stress* num voo em formação com aeronave Líder virtual. No entanto, o uso de um equipamento como óculos de realidade aumentada pode causar um sentimento de novidade capaz de alterar o estado do piloto. Dessa forma, o monitoramento de possíveis alterações de

níveis de *stress* causadas pela inserção de um novo equipamento e um novo método de treinamento são de interesse para a análise.

Para estimar o *stress* do piloto, utilizam-se dois sensores, ambos apresentados anteriormente na Seção 3.2.3: ECG, que monitora a resposta cardíaca do piloto, e o *GSR*, baseado no nível de sudorese.

Como resumo, os fatores e as métricas selecionados para avaliação da influência sobre o piloto do uso de realidade aumentada para treinamento de voo em formação são:

- Experiência e treinamento:
 - Performance (posicionamento relativo, variância e tempo em formação);
 - Evolução da performance entre início e fim do treinamento.
- Carga de trabalho:
 - Questionário *NASA-TLX*.
- *Stress*:
 - ECG (RRi, BPM, LnLF, LnHF, LF/HF);
 - *GSR*.

7.2 Projeto do Experimento

Conforme apresentado no Capítulo 6, a campanha experimental proposta baseia-se na hipótese que a comparação entre o treinamento com aeronave Líder real e o treinamento com aeronave projetada por sistema de realidade aumentada pode ser analisada com base nos resultados obtidos em ambiente de simulação. Nesse caso, compara-se as seguintes configurações:

- A. Treinamento onde a aeronave Líder é projetada pelo sistema visual do simulador SIVOR, e, portanto, encontra-se perfeitamente integrada ao ambiente externo, representando a situação em que a aeronave Líder é real;
- B. Treinamento onde a aeronave Líder é projetada em óculos de realidade aumentada integrado ao simulador SIVOR, representando a situação em que se utiliza a realidade aumentada no voo real.

7.2.1 Definição de hipóteses a serem avaliadas

As seguintes hipóteses são avaliadas nessa campanha de experimento:

- H₁ - A transferência de treinamento não depende da configuração utilizada;
- H₂ - A performance desempenhada pelo piloto não depende da configuração utilizada;
- H₃ - A carga de trabalho percebida pelo piloto não depende da configuração utilizada;
- H₄ - O *stress* do piloto não depende da configuração utilizada.

7.2.2 Perfil dos participantes

Para viabilizar a execução do experimento, não se restringiu a participação a pilotos profissionais. Os voluntários participantes são “pilotos amadores”, com diferentes níveis de experiência em pilotagem de aeronave apenas em ambientes de simulação com variados níveis de fidelidade.

7.2.3 Procedimento experimental

O experimento proposto é composto de quatro fases:

- Etapa 1. Apresentação do experimento e familiarização com simulador;
- Etapa 2. Avaliação de transferência de treinamento;
- Etapa 3. Avaliação de performance, carga de trabalho e *stress*;
- Etapa 4. Conclusão do experimento.

A seguir detalha-se cada uma dessas etapas, descrevendo as principais atividades e tarefas realizadas.

Etapa 1. Apresentação do experimento e familiarização com simulador

O experimento inicia-se com algumas atividades de preparação e familiarização, que devem ser realizadas por todos os participantes:

Todos os pilotos participantes, antes do início da coleta de dados, devem ser submetidos ao procedimento de *briefing*, detalhado na lista abaixo, para reconhecimento e nivelamento de habilidades básicas inerentes a utilização de um sistema novo (SIVOR e óculos AR):

- 1.1. Apresentação dos objetivos da pesquisa e explicação detalhada sobre a tarefa a ser executada nas próximas etapas.

- 1.2. Assinatura do termo de consentimento livre e esclarecido.
- 1.3. Apresentação do simulador SIVOR e comandos necessários para o experimento, como aqueles necessários para manutenção de altitude e velocidade, tarefas críticas para a manutenção de uma formação básica.
- 1.4. Execução de voo de familiarização com o simulador (fora de formação), por período de 10 min, durante o qual o piloto é orientado a executar algumas tarefas de modificação de altitude e velocidade.
- 1.5. Instalação de sensores fisiológicos no piloto (ECG e GSR);
- 1.6. Reapresentação da tarefa a ser executada na próxima etapa, enfatizando os objetivos e critérios adotados para avaliação do treinamento do voo em formação.

Etapas 2. Avaliação de transferência de treinamento

Esta etapa segue uma configuração do tipo *between-subjects*, onde os pilotos que participam do experimento são divididos em dois grupos. Na tentativa de manter homogeneidade entre grupos, utiliza-se o desempenho do piloto na execução do voo de familiarização, procurando-se manter pilotos com desempenhos semelhantes em grupos distintos.

Cada grupo realiza a tarefa especificada usando apenas uma das duas configurações apresentadas na seção anterior (Configuração A: Líder projetado pelo sistema virtual; Configuração B: Líder projetado pelo sistema de realidade aumentada). A tarefa executada nesta etapa é composta por:

- 2.1. Período inicial de voo com piloto automático ligado, que coloca a aeronave Líder e Ala alinhados e nivelados com uma distância de 250m entre os aviões – nesse momento o piloto automático é desligado e o controle da aeronave passa ao piloto. Este passo foi introduzido para reduzir a dificuldade do experimento, evitando a necessidade de piloto ter que executar o pareamento entre as aeronaves.
- 2.2. Treinamento de voo em formação sob supervisão, realizado por um período de 15 minutos, durante os quais o piloto recebe instruções sobre como aprimorar sua performance.
- 2.3. Treinamento de voo em formação sem supervisão, realizado por um período de 30 min.

O treinamento realizado consiste em executar um voo em formatura básica, onde a aeronave Ala deve seguir a aeronave Líder que se mantém em proa constante, executando apenas pequenas oscilações de elevação ao entorno de uma altitude de 10000ft.

Ainda que aparente ser uma tarefa simples, a manutenção da formação representa um grau de dificuldade elevado para pilotos amadores. Para minimizar a dificuldade do treinamento e permitir que voluntários sem experiência participem, limita-se o grau de liberdade de rolamento do Ala, permitindo apenas controle de elevação, por meio do manche, e de potência por meio do manete de potência.

Além disso, com o objetivo de eliminar a carga de trabalho adicional correspondente ao alinhamento de referências entre o avião Ala e o Líder para o cálculo da distância entre as aeronaves, uma esfera com código de cores de aproximação é exibida acima do avião Líder, conforme ilustrado na Figura 7-2.

Com as simplificações descritas, a tarefa de treinamento resume-se a seguir o avião Líder mantendo-o o máximo de tempo possível dentro do campo de visão e com a esfera em cor verde.

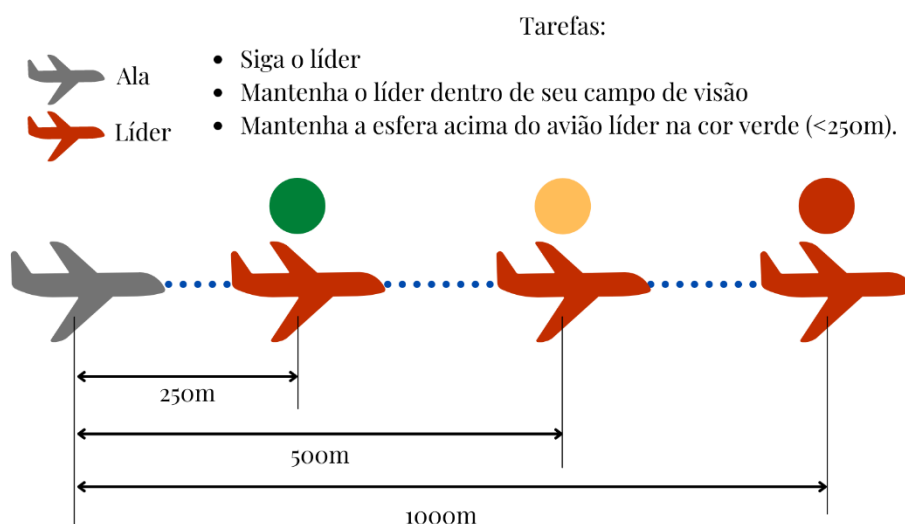


Figura 7-2. Tarefa de treinamento

O voo da aeronave Líder encontra-se gravado em um arquivo de *playback* e é reiniciado de forma automática e repetida dentro dos intervalos de treinamento sob supervisão e sem supervisão. O voo tem duração de cerca de 8 min. Observa-se que o uso de um voo gravado garante a repetibilidade do experimento nas duas configurações analisadas.

Etapa 3. Avaliação de performance, carga de trabalho e stress

Nesta etapa, diferentemente da anterior, os participantes devem executar o voo utilizando as duas configurações (Configuração A: Líder projetado pelo sistema virtual; Configuração B: Líder projetado pelo sistema de realidade aumentada).

São realizadas 6 rodadas de treinamento, sendo 3 com cada configuração. A ordem com que as configurações são utilizadas é aleatória. Cada rodada tem duração de 3 minutos e a tarefa a ser executada é a mesma do treinamento sem supervisão da etapa anterior. Cada rodada é seguida por um período de relaxamento de 2 minutos para reduzir o nível de *stress* induzido pelo experimento antes da próxima rodada.

Etapa 4. Conclusão do experimento

Após a conclusão dos voos relativos à Etapa 3, o piloto é convidado a responder 2 questionários *NASA-TLX*, um correspondente a cada uma das duas configurações do ambiente de simulação de voo em formação.

7.3 Processamento dos dados

Esta seção apresenta proposta para processamento dos dados a serem coletados no experimento especificado na seção anterior.

7.3.1 Dados coletadas e variáveis calculadas

Durante o experimento são coletados os seguintes dados:

- Atitude da aeronave Ala (*roll*, *pitch* e *true heading*);
- Altitude, *airspeed*, *rate of climb*;
- Velocidades angulares (P, Q e R);
- Dados de *GPS* (latitude e longitude);
- Deflexões de comandos (*inceptors*);
- Potência da aeronave e comando de potência;
- Dados de superfícies de comando (profundor, aileron, leme, flaps e trem de pouso);
- Dados fisiológicos determinados (*GSR*, ECG e sensor de respiração).

Observa-se que nem todos os dados coletados são utilizados na análise de dados descrita nesta tese.

Cálculo da performance

A performance é calculada para cada piloto e para cada rodada da Etapa 3 a partir dos dados de *GPS* (latitude e longitude) das aeronaves Líder e Ala, sendo composta pelas seguintes variáveis:

- Média do módulo do vetor distância entre Ala e Líder, medida em metros (MeanMod);
- Desvio padrão do módulo do vetor distância entre Ala e Líder, medido em metros (StdMod);
- Tempo de formação em menos de 250 m, medido em segundos (T250);
- Tempo de formação em menos de 500 m, medido em segundos (T500).

Observa-se que a definição das variáveis T250 e T500 estão relacionadas aos períodos em que a esfera acima da aeronave se encontra nas cores verde e amarela, respectivamente, correspondente aos limites ilustrados na Figura 7-3.

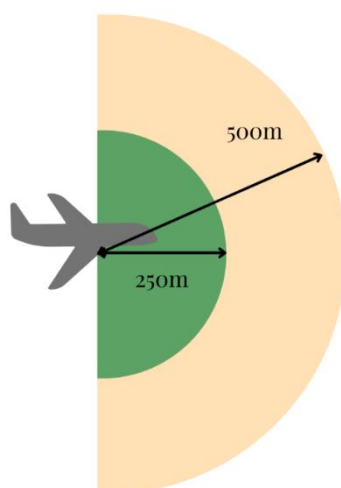


Figura 7-3. Limites de distância sinalizados ao piloto pela esfera de cores.

Cálculo da transferência de treinamento

Para cálculo da transferência de treinamento utilizam-se os dados coletados nos seguintes períodos:

- Ini: Período de 1 minuto, coletado após 8 minutos de voo de formação sob supervisão (Etapa 2.2);
- End: Período de 1 min, coletado antes do final do treinamento de formação (Etapa 2.3).

São então calculadas as seguintes variáveis para cada piloto:

- Variáveis de performance no período inicial de treinamento:
 - MeanMod_{Ini}, StdMod_{Ini}, T250_{Ini}, T500_{Ini};
- Variáveis de performance no período final de treinamento:

- $\text{MeanMod}_{\text{End}}$, $\text{StdMod}_{\text{End}}$, T250_{End} , T500_{End} ;
- Diferença de performance entre os períodos iniciais e finais:
 - DiffMeanMod , DiffStdMod , DiffT250 , DiffT500 .

Cálculo da carga de trabalho

Para cálculo da carga de trabalho utilizam-se as respostas do questionário *NASA-TLX* respondidos ao final do experimento, observando que, conforme apresentado anteriormente, cada piloto responde 2 questionários, um para cada configuração do ambiente de simulação.

O Cálculo de *score* utilizado leva em consideração uma atualização do questionário, onde em sequência a avaliação de Likert, são apresentados pares de fatores, por exemplo, Carga mental *versus* Carga Física, para que seja avaliada o grau de importância embutida em cada elemento. Após as 15 comparações executadas entre os fatores, o peso é calculado de acordo com o número de vezes que o fator prevaleceu.

O *Score* final é calculado através da média das pontuações dos fatores, ponderadas por seus respectivos pesos.

Cálculo do stress

Para cálculo do *stress*, utilizam-se os dados fisiológicos obtidos a partir dos sensores ECG e *GSR*. As seguintes variáveis são calculadas para cada piloto, para cada uma das 6 rodadas e para cada um dos 5 períodos de relaxamento, totalizando 11 medidas por variável por piloto.

BPM, RRi , LnLF , LnHF , LF/HF e *GSR* em cada situação de voo e em período de relaxamento

Os dados ECG bem como os *GSR* foram coletados através do software CAPTIV, em seguida exportados em formato texto, juntamente aos pontos de análise (marcadores internos do programa que são acionados quando atividades específicas são executadas, são denominados internamente de *Top Synchro*, normalmente utilizados para executar sincronização de dados entre *softwares* como é o caso presente). Os dados então são processados para que possam ser diferenciadas as fases de experimentação.

A última etapa é a inserção da série de dados ECG na plataforma *Kubios*, um programa capaz de realizar diversas análises das métricas de *HRV* como as detalhadas acima. O programa já executa de forma automática o cálculo entre picos e as análises em frequência. Os dados externalizados são compilados em uma tabela para serem analisados estatisticamente.

Os dados de *GSR* são processados através de uma rotina escrita em *Python*, que calcula as médias dos dados em cada situação, estes dados então são compilados para que sejam executadas as análises estatísticas necessárias

7.3.2 Modelos estatísticos para verificação das hipóteses

Esta seção apresenta os dois modelos estatísticos propostos para verificação das hipóteses.

O primeiro modelo é apresentado na Equação 1, onde a variável de interesse, V_{ij} , varia de acordo com a hipótese analisada:

$$V_{ij} = \mu + M_i + \beta_j + (M\beta)_{ij} + e_{ij} \quad (1)$$

onde:

- V_{ij} : Variável de saída;
- μ : Média geral da variável de saída;
- M_i : Variância proveniente do fator C, relativo à configuração do sistema de treinamento (A ou B);
- β_j : Variância proveniente do fator P, relativo ao piloto;
- $(M\beta)_{ij}$: Variância proveniente da interação entre os fatores C e P;
- e_{ij} : Variância proveniente de erro aleatório.

O fator P (piloto) expõe a influência proveniente de individualidades inerentes a cada piloto tais como: habilidade, experiência, condição emocional, condição física, entre outros. Já o fator C é relativo à configuração do sistema utilizado (Configuração A: Líder projetado pelo sistema visual; Configuração B: Líder projetado pelo sistema de realidade aumentada). Este fator é o foco principal da análise e é utilizado para investigar diferenças ou similaridades entre os efeitos dos ambientes de simulação no piloto. (configuração do ambiente de simulação)

O segundo modelo utilizado é apresentado na Equação 2, onde a variável de interesse, U_{ij} , varia de acordo com a hipótese analisada:

$$U_{ij} = \rho + S_i + \tau_j + \vartheta_{ij} \quad (2)$$

onde:

- U_{ij} : Variável de saída;
- ρ : Média geral da variável de saída;
- S_i : Variância proveniente do fator C, relativo à configuração do sistema de treinamento (A ou B);
- τ_j : Bloco proveniente do fator piloto;
- ϑ_{ij} : Variância proveniente de erro aleatório.

Observa-se que este segundo modelo estatístico é utilizado nos casos onde não é possível realizar repetições, desta forma, cada piloto é entendido como um bloco separado.

- ***H₁ - A transferência de treinamento não depende da configuração utilizada***

Para verificar a hipótese H₁ utilizam-se as variáveis relacionadas a performance coletadas no início e final do período de treinamento.

São realizadas as seguintes verificações com os dados de cada configuração, utilizando um teste-t unidimensional:

- MeanMod_{Ini} é estatisticamente diferente de MeanMod_{End}?
- StdMod_{Ini} é estatisticamente diferente de StdMod_{End}?
- T250_{Ini} é estatisticamente diferente de T250_{End}?
- T500_{Ini} é estatisticamente diferente de T500_{End}?

O resultado esperado é que ao final do período de treinamento as variáveis de performance indiquem uma melhora no desempenho do piloto, indicando que houve aprendizado durante o período.

São ainda realizadas as seguintes verificações, ainda relacionados com H₁, com os dados das duas configurações (SV e AR), utilizando um teste-t unidimensional:

- DiffMeanMod(AR) é estatisticamente diferente de DiffMeanMod(SV)?
- DiffStdMod(AR) é estatisticamente diferente de DiffStdMod(SV)?
- DiffT250(AR) é estatisticamente diferente de DiffT250(SV)?
- DiffT500(AR) é estatisticamente diferente de DiffT500(SV)?

Nesse caso, o comportamento esperado é que não haja diferença entre a melhora de performance com as duas configurações, indicando que o treinamento nas duas configurações é equivalente.

• ***H₂ - A performance desempenhada pelo piloto não depende da configuração utilizada***

Para verificar a hipótese H₂ utilizam-se as variáveis relacionadas a performance coletada ao longo das seis rodadas que compõem a segunda etapa do treinamento. São realizadas as seguintes verificações, utilizando análise de variância (ANOVA) e o modelo da Eq. 1:

- MeanMod(AR) é estatisticamente diferente de MeanMod(SV)?
- StdMod(AR) é estatisticamente diferente de StdMod(SV)?
- T250(AR) é estatisticamente diferente de T250(SV)?
- T500(AR) é estatisticamente diferente de T500(SV)?

Devido a impossibilidade de realizar experimentos com um grande número de voluntários, para as verificações acima, propõe-se considerar um intervalo de confiança de 90%, equivalente a *p-value* menor que 0,1.

Observa-se que o comportamento esperado é que não haja diferença significativa entre as duas configurações.

Ainda, devem ser executados os seguintes testes para avaliar a aplicabilidade da ANOVA:

- Normalidade de amostra: avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk que determina se o conjunto de dados se enquadra num perfil normal de distribuição. Considera-se como limite para normalidade *p-value* maior que 0,05.
- Homogeneidade de variâncias, ou homogeneidade de variâncias: avaliada por meio do teste de Bartlett tanto para o fator piloto, quanto para o fator sistema. Considera-se como limite para homogeneidade *p-value* maior que 0,05.

• ***H₃ - A carga de trabalho percebida pelo piloto não depende da configuração utilizada***

A hipótese H₃, diferentemente da H₂, é avaliada utilizando ANOVA e o modelo da Eq. 2, aplicado a variável *ScoreTLX*. Apesar da interação entre fatores não ser considerada nesse modelo, sua adoção é necessária devido a impossibilidade de execução de repetições.

De forma semelhante ao realizado para H₂, considera-se intervalo de confiança de 90% e são executados os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, com *p-value* maior que 0,05, para comprovação de normalidade e homogeneidade.

De forma semelhante a H₂, o comportamento esperado é que não haja diferença significativa entre as duas configurações.

• ***H₄ - O stress do piloto não depende da configuração utilizada.***

A análise de *stress* é realizada por meio da aplicação da ANOVA e teste de Tukey às variáveis BPM, RRi, LnLF, LnHF, LF/HF e GSR, considerando o modelo da Eq. 1. Observa-se que nesse caso o fator C, correspondente a configuração do sistema de treinamento, tem 3 níveis, sendo 2 correspondentes as configurações SV e AR discutidas e um terceiro nível correspondente ao período de relaxamento entre as rodadas (configuração LX).

Para cada uma das variáveis são realizadas as seguintes verificações:

- O fator C é estatisticamente significativo para a variável BPM?
- BPM(AR) é estatisticamente diferente de BPM(LX)?
- BPM(AR) é estatisticamente diferente de BPM(SV)?
- BPM(SV) é estatisticamente diferente de BPM(LX)?

De forma semelhante ao realizado para H₂ e H₃, ainda são executados para esta análise os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, considerando *p-value* maior que 0,05 para comprovação de normalidade e homogeneidade.

O comportamento esperado é que as variáveis durante o repouso (configuração LX) tenham valores diferentes daquelas durante o voo nas configurações SV e AR, mas que não haja diferença entre SV e AR.

7.4 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou uma proposta de experimento para analisar o impacto da inserção de realidade aumentada no treinamento de voo de formatura básica. O experimento proposto considera o uso do protótipo apresentado no Capítulo 6, integrado ao simulador de voo SIVOR. Ele baseia-se na comparação de duas configurações: o voo onde a aeronave Líder é projetada por meio de óculo de realidade aumentada e o voo onde a aeronave Líder é projetada pelo sistema visual do simulador SIVOR.

A proposta concentra-se na análise de fatores humanos, como carga de trabalho e *stress*, além da performance e transferência de treinamento. As hipóteses definidas têm como objetivo confirmar o aprendizado durante o experimento por meio da melhora de performance e identificar diferenças entre as duas configurações.

8 Resultados e Discussões

Este capítulo discute os resultados obtidos a partir da execução do experimento proposto no Capítulo 7.

A partir dos resultados obtidos, são calculadas as variáveis indicadas na Seção 7.3.1 e verificadas as hipóteses elencadas na Seção 7.2.1, conforme os procedimentos descritos na Seção 7.3.2. Os dados coletados durante os experimentos são apresentados no Apêndice 2.

8.1 Realização do experimento

Inicialmente, observa-se que o experimento realizado para esta tese é parte do projeto “Análise do Comportamento de Pilotos em Simuladores de Voo”, registrado na Plataforma Brasil sob o número CAAE 90300818.2.0000.5503 e aprovado por Comitê de Ética conforme normas vigentes.

Devido às restrições por causa da pandemia em curso durante o desenvolvimento desse trabalho, não foi possível realizar o experimento com um grande número de voluntários.

O experimento foi limitado a um conjunto de 10 voluntários, recrutados entre os alunos e frequentadores do CCM-ITA. É importante salientar que, devido ao baixo número de voluntários e sua heterogeneidade, as análises apresentadas neste capítulo consideram um intervalo de confiança de 90%, equivalente a $p\text{-value} < 0,1$.

A definição do número de voluntários e nível de significância é baseada na experiência adquirida em experimentos anteriores realizados pelo autor desta tese e relacionados a investigação de fatores humanos na aviação (ARJONI, ROCHA, *et al.*, 2016), (MOREIRA, ARJONI, *et al.*, 2016), (ARJONI, KRAEMER e VILLANI, 2017), (ARJONI, VILLANI, *et al.*, 2018), (KRAEMER, VILLANI e ARJONI, 2019).

Dos participantes, 9 eram homens e uma era mulher, todos com idades entre 20 e 35 anos, sem experiência prévia de voo real, tampouco treinamento aeronáutico.

Os pilotos foram divididos em grupos que respeitassem uma homogeneidade de performance previamente avaliada de forma subjetiva, com o objetivo de evitar enviesamento da amostra.

8.2 Resultados de Performance

As variáveis relativas à performance são calculadas diretamente através dos dados coletados em cada um dos voos de 3 minutos. As Figura 8-1 e Figura 8-2 ilustram dois trechos de 3 min considerados para o cálculo dos parâmetros. Em ambos os casos a variável medida é a distância entre a aeronave Ala e a aeronave Líder. A curva amarela representa a atuação do sistema de *autopilot* (quando em 200) ou a ausência de interferência do *autopilot* (quando em 0), indicando que o piloto assumiu o controle da aeronave. A curva azul representa a distância entre as aeronaves quando o *autopilot* está ativo e a curva vermelha representa este comportamento quando o piloto está no controle.

Considerando que o piloto foi instruído a manter a distância entre as aeronaves abaixo de 250 m, a Figura 8-1 ilustra um piloto visualmente com baixo desempenho durante a rodada. Já na Figura 8-2, tem-se o perfil de um piloto com performance acima da média.

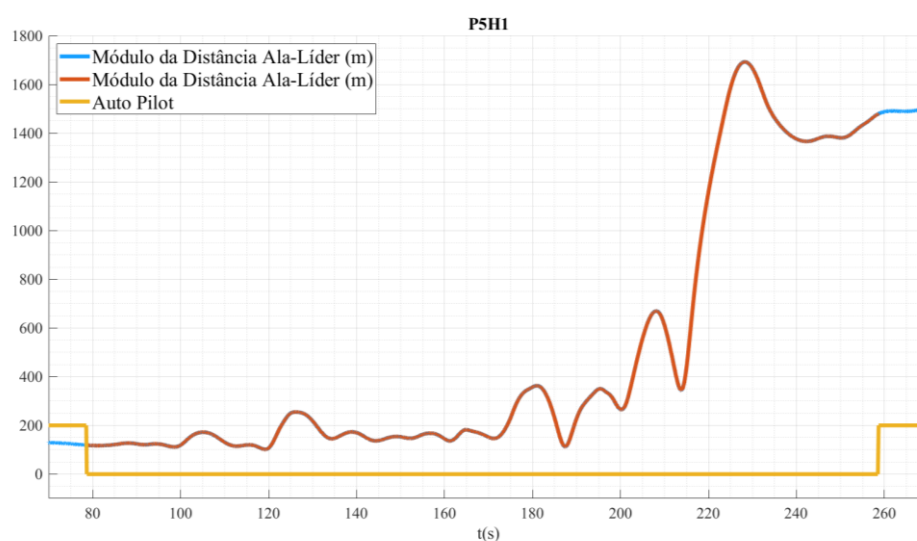


Figura 8-1. Piloto com baixa performance de formação.

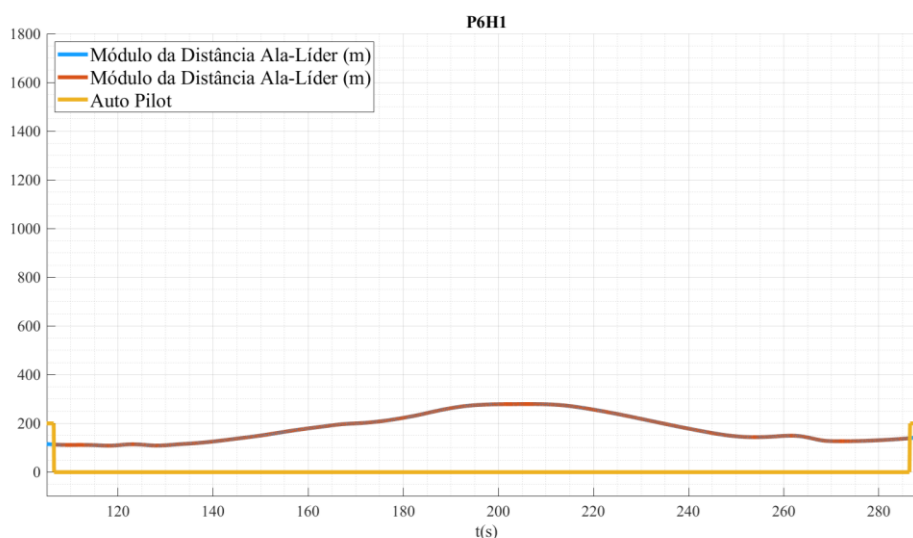


Figura 8-2. Piloto com alta performance de formação.

A partir dos dados coletados nas rodadas de 3 min executadas pelos pilotos, foram calculadas as quatro variáveis relativas à performance do piloto durante o voo:

- Média do módulo da distância entre Ala e Líder medido em metros (MeanMod);
- Desvio padrão da distância entre Ala e Líder medido em metros (StdMod);
- Tempo de formação em menos de 250 m medido em segundos (T250);
- Tempo de formação em menos de 500m medido em segundos (T500).

O Apêndice 2 apresenta as variáveis calculadas para cada caso. Os resultados são discutidos ao longo das próximas subseções.

8.2.1 Média e Desvio Padrão do Módulo da Distância de Formação

Iniciou-se a análise submetendo os dados referentes à variável MeanMod ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e ao teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8-1 e indicam problemas em relação a hipótese de normalidade e homogeneidade.

Tabela 8-1. Resultados iniciais da análise de performance

Teste	MeanMod p-value
Shapiro-Wilk	1.92E-04
Bartlett Piloto	0.2819
Bartlett Sistema	2.43E-09
Influência Piloto	2.51E-09
Influência Sistema	0.111
Influência Interação Piloto Sistema	9.81E-05

A partir da análise dos resíduos em um gráfico Q-Q (Figura 8-3), percebe-se uma tendência nos dados a um comportamento pouco normal à medida que se afasta da região central do gráfico. Analisando os perfis, observa-se que os pilotos tendem a exponenciar seu erro ao tentar corrigi-lo. As correções aplicadas se mostram ineficazes e tem efeito negativo na performance entrando, de certa forma, em ressonância com o sistema.

Uma vez constatado esse comportamento, ordenou-se os dados em ordem crescente, conforme ilustrado na Figura 8-4. Neste gráfico, fica evidente a tendência a um comportamento exponencial.

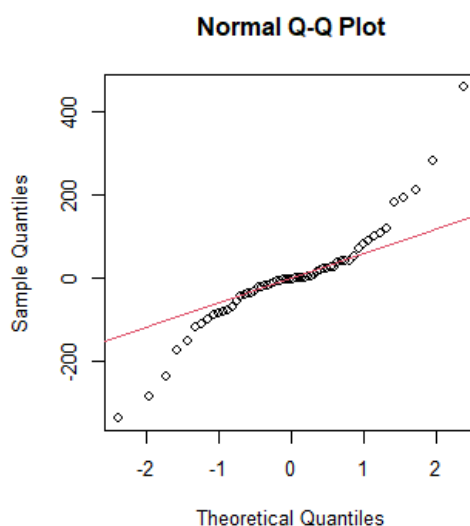


Figura 8-3. Resíduos com tendência não linear sobre a reta.

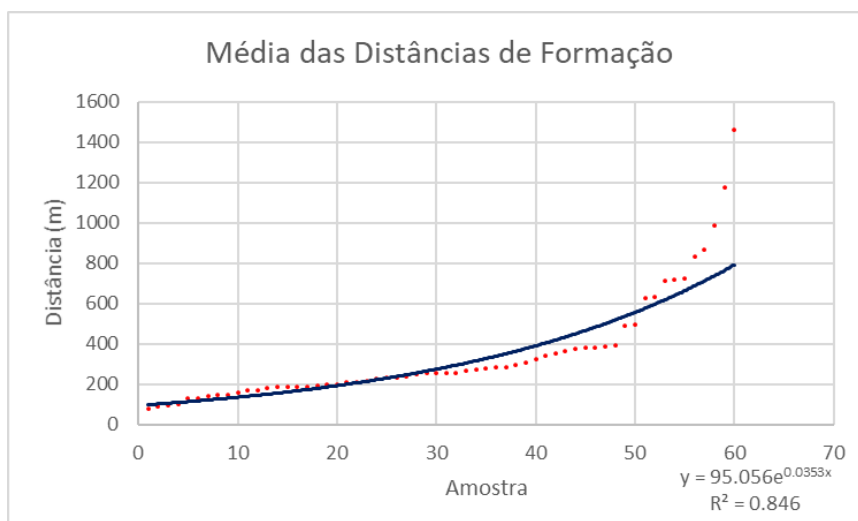


Figura 8-4. Curva exponencial aproximada com R^2 0,846.

Para “normalizar” os dados e habilitar que a tendência exponencial seja devidamente linearizada, a série é tratada através de uma transformação logarítmica, melhorando os valores dos testes de normalidade e Homogeneidade de Variâncias e habilitando a reexecução de uma análise ANOVA.

Os resultados dos testes de normalidade e Homogeneidade de Variâncias, após a transformação logarítmica, são apresentados na Tabela 8-2 e comprovam a adequação da transformação realizada. Para todos os testes, a condição $p\text{-value} > 0,05$ foi atendida. Visualmente, a condição de normalidade pode ser comprovada por meio da análise dos gráficos normal Q-Q, apresentados na Figura 8-5 e na Figura 8-6, nelas também são apresentados os gráficos de dispersão de resíduos, que confirmam a homogeneidade de variâncias dos dados.

Tabela 8-2. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Ln(MeanMod) e Ln(StdMod).

Teste	Ln(MeanMod) p-value	Ln(StdMod) p-value
Shapiro-Wilk	0,2086	0,4122
Bartlett Piloto	0,4155	0,4899
Bartlett Configuração	0,9111	0,3645

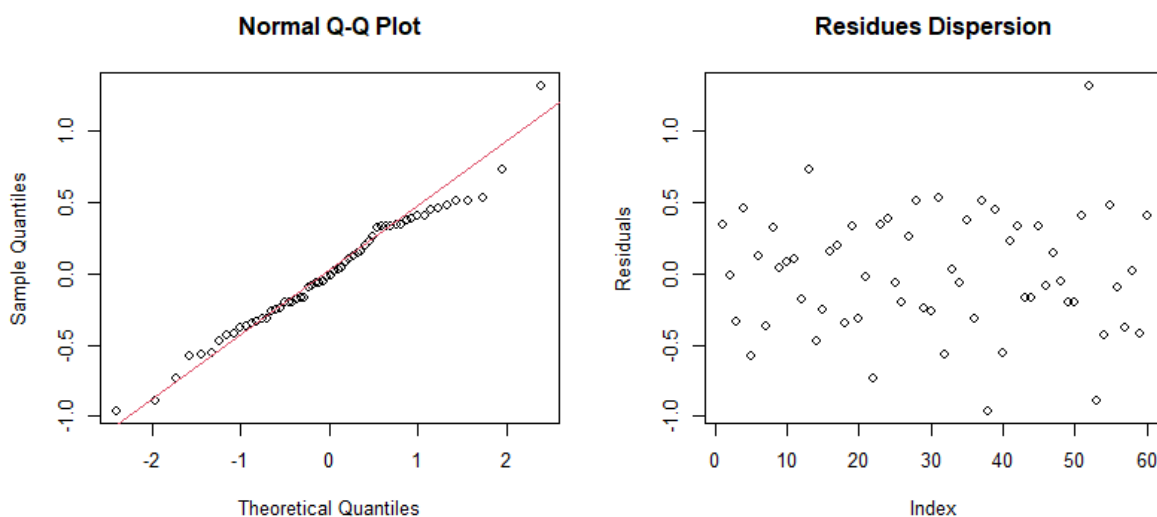


Figura 8-5. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Ln(MeanMod).

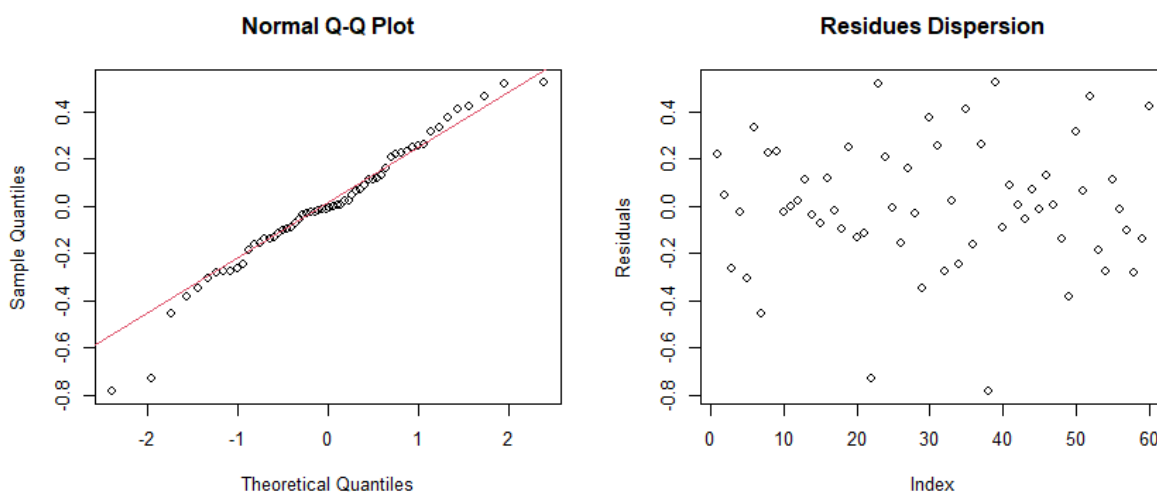


Figura 8-6. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Ln(StdMod)

Uma vez comprovada a normalidade dos dados, passou-se à análise de variância para identificar os fatores ou combinação de fatores que afetam de forma significativa o valor das variáveis analisadas (LnMeanMod e LnStdMod). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8-3 e consideram o modelo descrito pela Eq. 1 apresentada na Seção 7.3.2.

Tabela 8-3. Análise de variância - LnMeanMod e LnStdMod.

	LnMeanMod p-value	LnStdMod p-value
Influência do piloto (fator P)	3.29E-11	1.49E-11
Influência da configuração (fator C)	0.06759	0.2407
Influência da interação entre os fatores P e C	4.37E-03	4.60E-03

Analizando os *p-values* obtidos e considerando o nível de confiança adotado de 10%, observa-se que o fator de maior influência para ambas as variáveis LnMeanMod e LnStdMod é o piloto (fator P). Esse resultado já era esperado, dada a variação natural de aptidão para tarefa de pilotagem existente entre seres humanos. A influência do fator piloto é um resultado que tem sido observado na maioria dos experimentos relacionados a pilotagem que foram executados nos últimos anos no CCM. O segundo termo de maior influência, ainda para ambas as variáveis, é a interação entre os fatores P e C.

Para finalizar observa-se que, para a variável LnMeanMod, a configuração adotada na simulação também foi identificada como um fator influente, com *p-value* < 0,1, indicando que, nesse caso, o uso de realidade aumentada tem impacto na performance do piloto. No entanto, a mesma influência não foi observada para a variável LnStdMod, que apresentou um *p-value* mais elevado.

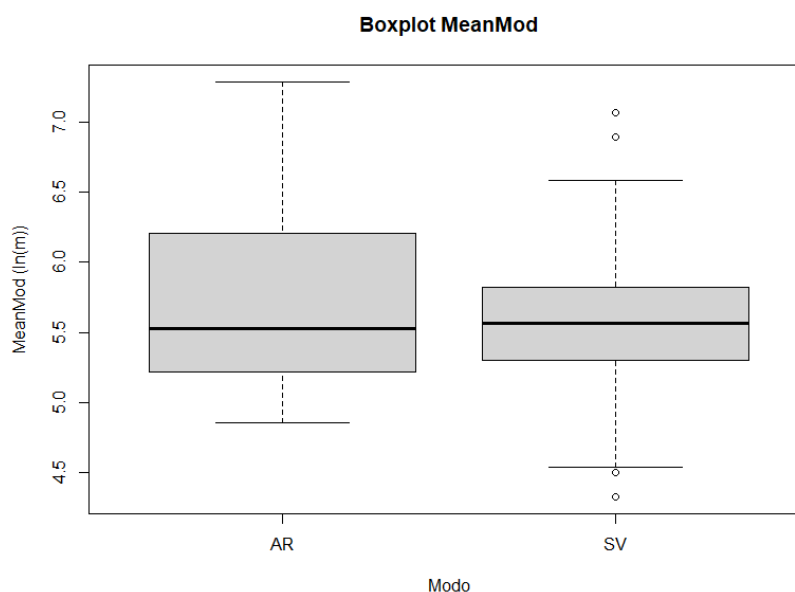


Figura 8-7. Boxplot para Ln(MeanMod).

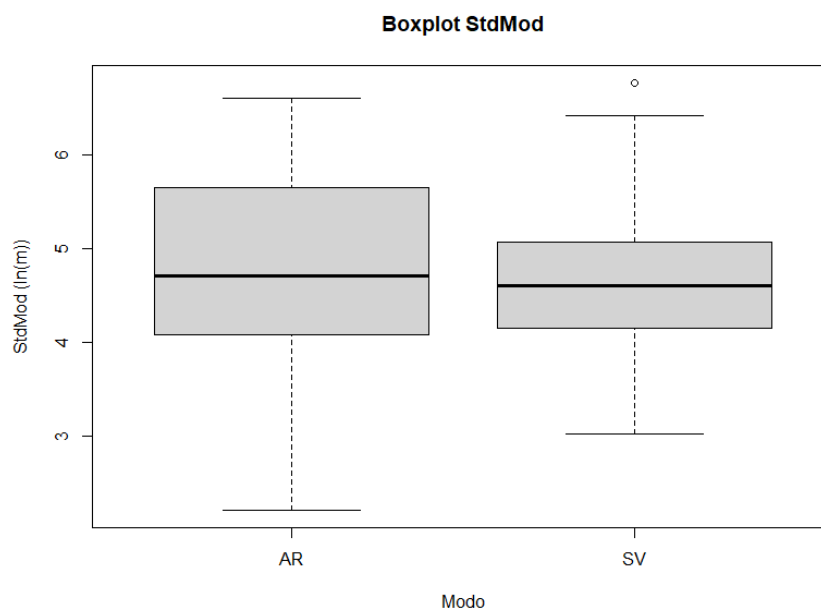


Figura 8-8. Boxplot para $\text{Ln}(\text{StdMod})$.

Concluindo a análise, observa-se que, quando utilizando realidade aumentada, a tendência do piloto é manter-se mais afastado da aeronave Líder. No entanto, a variação da distância, representada pela variável LnStdMod não é afetada de forma significativa. Além disso, é importante observar a significância do acoplamento entre os fatores P e C, o que indica que cada pessoa apresenta uma sensibilidade diferente ao uso da realidade aumentada.

8.2.2 Tempos de Formação

A análise do período de tempo, durante o intervalo de 3 min, em que o piloto permanece em formação é realizada por meio das variáveis T250 e T500, correspondentes a somatória dos períodos em que o piloto é capaz de se manter em formação dentro do raio de 250m e dentro do raio de 500m.

Após o cálculo das variáveis, observou-se que apenas a variável T250 é relevante para a presente análise, dado que diversos pilotos se mantiveram dentro da distância de 500m durante todo o período de 3 min, conforme apresentado no Apêndice 2.

A análise de normalidade e homogeneidade de variâncias apresentaram resultados satisfatórios, conforme pode ser observado na Tabela 8-4 e na Figura 8-9.

Tabela 8-4. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – T250.

Teste	T250 p-value
Shapiro-Wilk	0,3103
Bartlett Piloto	0,1087
Bartlett Configuração	0,5045

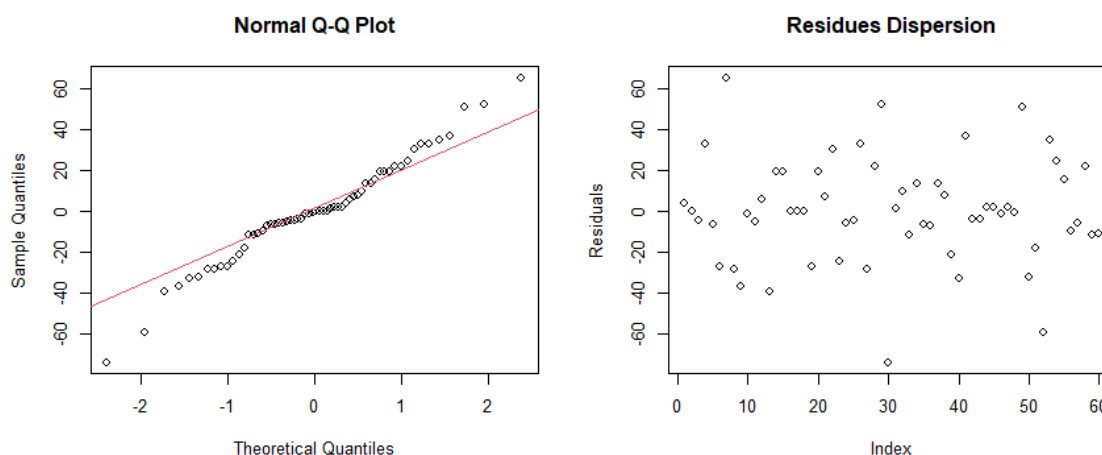


Figura 8-9. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – T250.

Os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 8-5 e indicam apenas a influência do fator piloto no tempo em formação, com $p\text{-value} < 0,1$. Neste caso, o uso de realidade aumentada não apresentou influência no tempo em que o piloto permanece em formação. Também não foi observado interação significativa entre os fatores. Os Boxplot para ambos os fatores são apresentados na Figura 8-10 e confirmam visualmente os resultados da Tabela 8-5.

Tabela 8-5. Análise de variância – T250.

	T250 $p\text{-value}$
Influência do piloto (fator P)	5,99E-11
Influência da configuração (fator C)	0,719
Influência da interação entre os fatores P e C	0,294

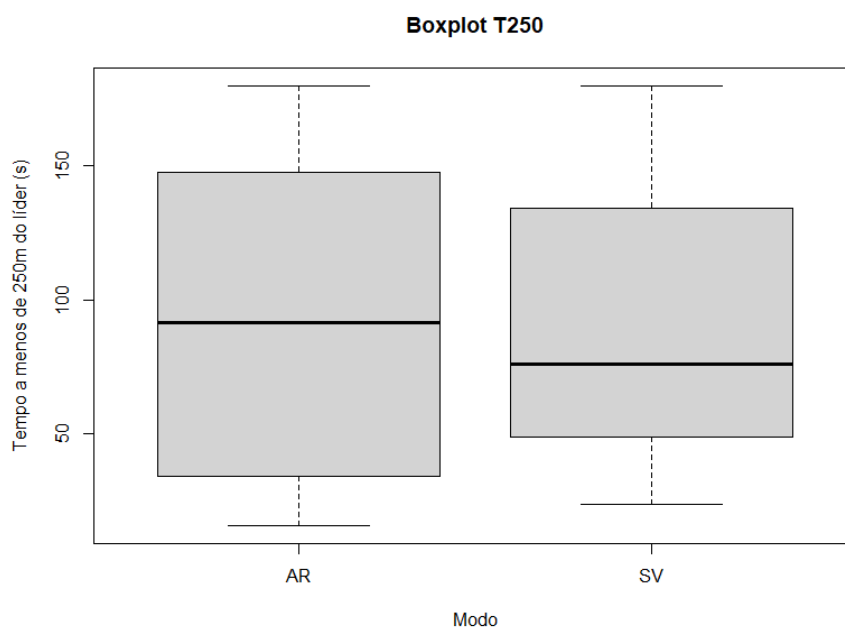


Figura 8-10. Boxplot para o fator C – Variáveis T250.

8.2.3 Análise da hipótese H₂

A partir dos resultados apresentados nas seções anteriores, analisa-se a hipótese H₂:

- ***H₂ - A performance desempenhada pelo piloto não depende da configuração utilizada***

O experimento proposto considerou três variáveis para analisar a influência do sistema de realidade aumentada no piloto, correspondentes à distância média mantida na formação, à variação desta distância e ao tempo em formação. O resultado obtido indicou que a introdução do sistema de realidade aumentada resulta numa tendência de o piloto manter-se a uma distância maior, enquanto a variação da distância entre as aeronaves e o tempo em formação não foram afetados. Refuta-se, portanto, a hipótese H₂.

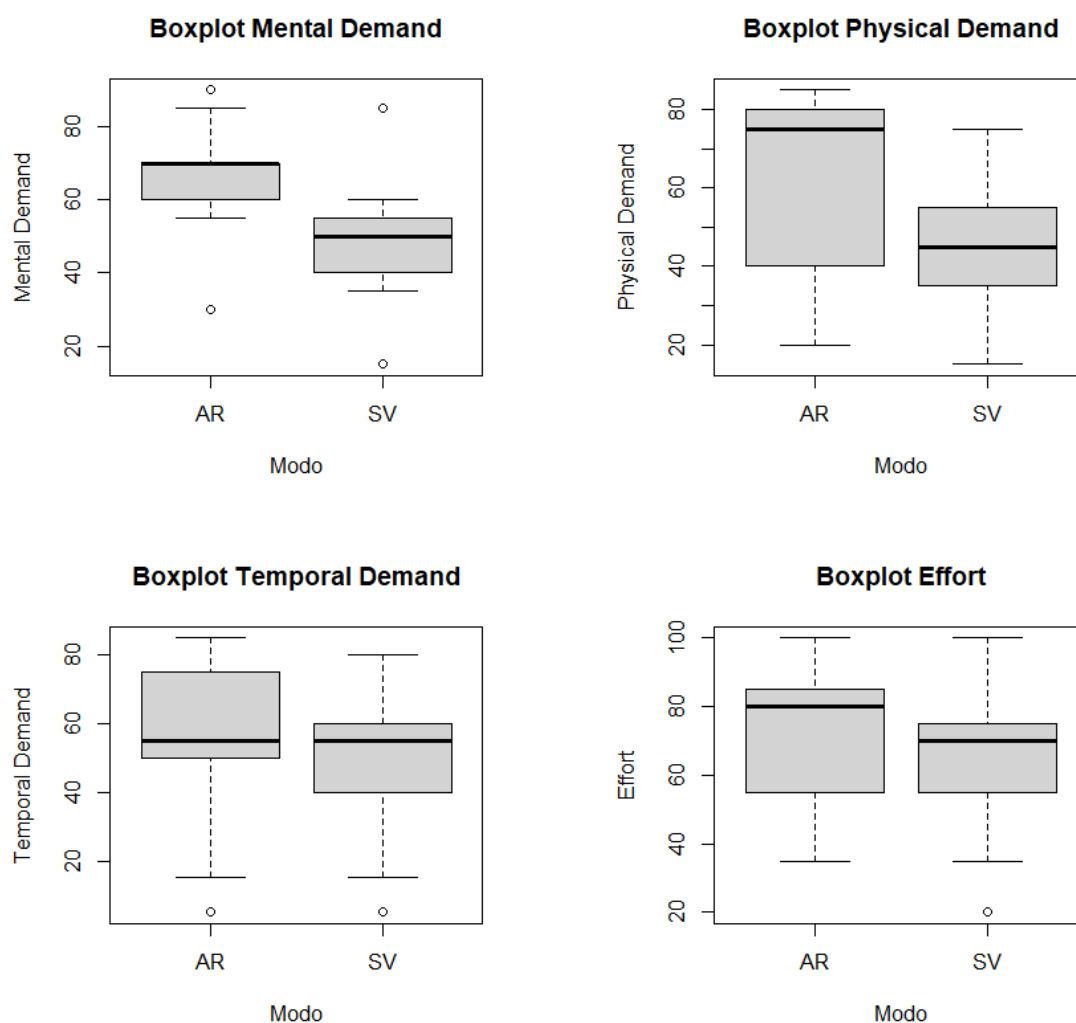
8.3 Análise da carga de trabalho

A análise da carga de trabalho para cada configuração exercitada no experimento é realizada por meio da análise das respostas ao questionário *NASA-TLX*. Observa-se que, conforme mencionado anteriormente, cada piloto respondeu o questionário duas vezes, uma para cada configuração (com e sem uso de realidade aumentada).

8.3.1 NASA-TLX

Conforme apresentado anteriormente, o questionário *NASA-TLX* é composto por seis fatores (carga mental, carga física, carga temporal, performance, esforço e frustração), para cada um dos quais o piloto deve atribuir um valor numa escala de 1 a 100 (modificando levemente a normalmente adotada de 0 a 20 de forma proporcional para permitir uma análise mais completa). Observa-se que um dos pilotos se confundiu ao responder o questionário, o que resultou na exclusão das suas respostas do conjunto de dados, restando válidas apenas as respostas dos demais 9 pilotos.

A Figura 8-11 apresenta os Boxplots das análises realizadas a partir dos valores atribuídos pelos pilotos a cada um dos fatores e para cada uma das configurações (com/sem realidade aumentada).



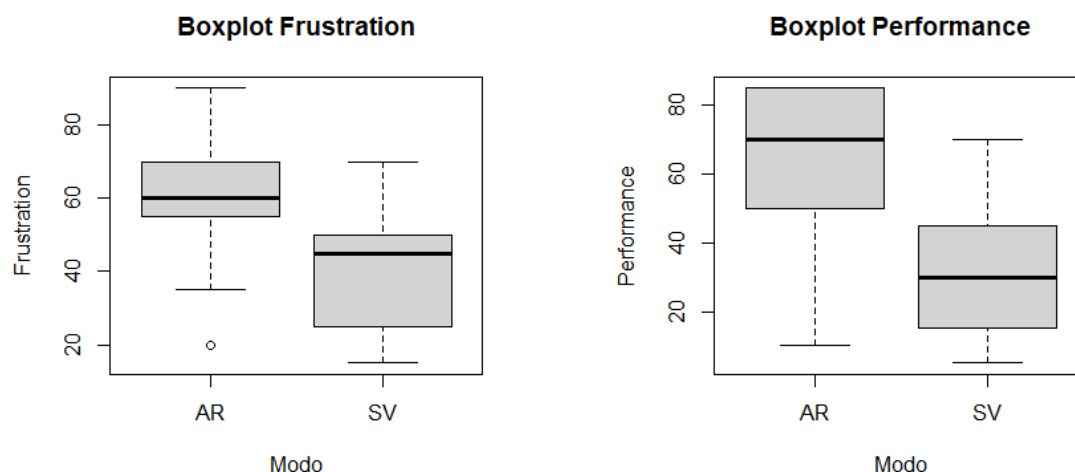


Figura 8-11. Boxplots de Fatores *TLX* separados.

A Tabela 8-6 apresenta as análises de normalidade e homogeneidade de variâncias de cada um dos fatores *TLX* estudados de forma separada.

Tabela 8-6. Resultados para fatores *TLX* separados.

	Shapiro-Wilk	Bartlett Sistema	p-value
Demanda Mental	0,9152	0,7982	0,052
Demanda Física	0,9813	0,39	0,0282
Demanda Temporal	0,9722	0,6902	0,4173
Esforço	0,7024	0,7769	0,03036
Frustração	0,6864	0,6402	0,01
Performance	0,3441	0,7816	0,0309

Analisando os dados obtidos e utilizando o *Boxplots*, pode-se inferir que, separadamente, os fatores apresentam aumento claro de carga de trabalho quando ocorre o voo com o uso dos óculos de realidade aumentada.

A partir das notas atribuídas a cada fator e dos pesos determinados por meio da comparação dois-a-dois entre os fatores, calcula-se a média ponderada correspondente à variável *ScoreTLX*, representativa da carga de trabalho. Os valores obtidos são apresentados no Apêndice 2.

Considera-se então o modelo correspondente a Eq. 2, apresentado na Seção 7.3.2 para análise de variância. Conforme realizado para as variáveis associadas à performance,

primeiramente verifica-se a normalidade e homogeneidade de variâncias da amostra, que são confirmadas pelos resultados obtidos com os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett (Tabela 8-7) e pelos gráficos de dispersão de resíduos e normal Q-Q (Figura 8-12).

Tabela 8-7. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias - ScoreTLX.

Teste	ScoreTLX p-value
Shapiro-Wilk	0,1827
Bartlett Piloto	0,282
Bartlett Configuração	0,3015

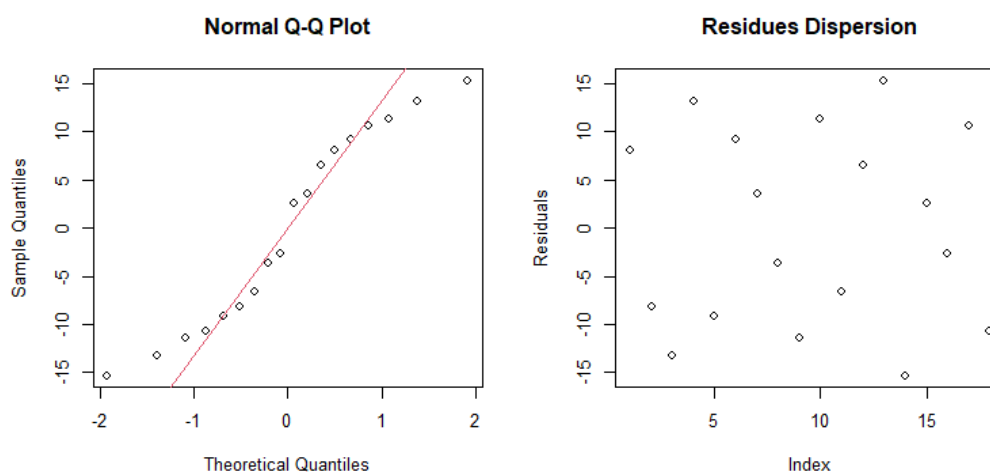


Figura 8-12. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – ScoreTLX.

Avalia-se, por meio da ANOVA, então a influência da configuração (fator C, correspondente ao uso ou não da realidade aumentada), e do piloto (fator P) no valor da variável ScoreTLX. Os resultados são apresentados na Tabela 8-8 e indicam que ambos os fatores são significantes, considerando o intervalo de confiança adotado de 90% ($p\text{-value} < 0,1$).

Tabela 8-8. Análise de variância – ScoreTLX.

	p-value – TLX
Influência do bloco piloto (fator P)	7,05E-01
Influência da configuração (fator C)	0,0362

Analisando o gráfico Boxplot da Figura 8-13, observa-se claramente que a carga de trabalho atribuída à configuração com uso de realidade aumentada é maior que aquela do caso em que a aeronave Líder é projetada pelo sistema visual.

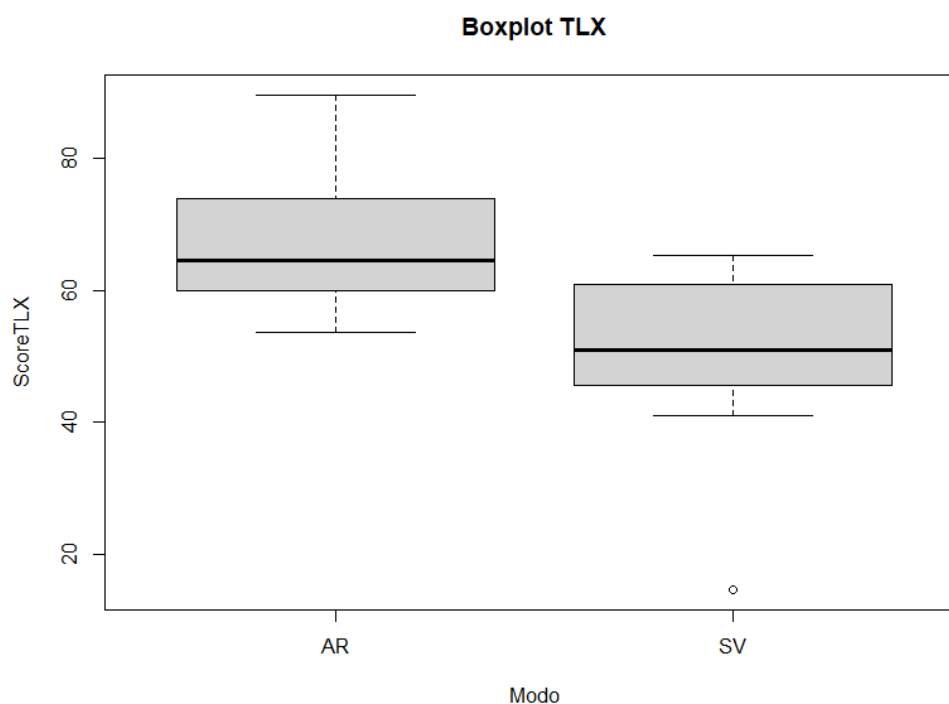


Figura 8-13. Boxplot para Variável ScoreTLX.

8.3.2 Análise da hipótese H_3

A partir dos resultados apresentados na seção anterior, analisa-se a hipótese H_3 :

- **H_3 - A carga de trabalho percebida pelo piloto não depende da configuração utilizada**

A hipótese H_3 foi refutada pelos resultados do experimento, que indicaram uma carga de trabalho maior para o caso em que a aeronave Líder é projetada pelos óculos de realidade aumentada.

Uma análise das respostas atribuídas a cada fator do questionário *NASA-TLX* indica a mesma tendência de aumento de carga de trabalho com o uso dos óculos.

Entre as possíveis explicações, considera-se também uma maior facilidade para perder a aeronave Líder de vista, dado o campo de visão limitado dos óculos, e a diferença no brilho e nitidez da projeção, que pode exigir um maior esforço e atenção da parte do piloto.

8.4 Análise de *stress*

O impacto do uso de realidade aumentada no *stress* sentido pelo piloto é analisado com base nos dados coletados pelos sensores fisiológicos ECG e *GSR*.

Para análise de variância adota-se o modelo da Eq. 1, apresentado na Seção 7.3.2. Observa-se, no entanto, o fator C, correspondente a configuração usada no treinamento, neste caso possui um nível adicional, correspondente a situação de relaxamento entre as rodadas:

- Configuração SV: treinamento com Líder projetado pelo sistema virtual (rodada de 3 min);
- Configuração AR: treinamento com Líder projetado pelo sistema de realidade aumentada (rodada de 3 min);
- Configuração LX: período de relaxamento entre rodadas (1 min).

8.4.1 ECG

A partir dos sinais de batimento cardíaco são calculadas as variáveis BPM, RRi, LnLF, LnHF e LF/HF. Conforme realizado anteriormente, inicia-se a análise com a verificação de normalidade e homogeneidade de variâncias dos dados, que foi confirmada pelos resultados obtidos (Tabela 8-9). Os gráficos de dispersão de resíduos e normal Q-Q são apresentados na sequência (Figura 8-14, Figura 8-15, Figura 8-16, Figura 8-17 e Figura 8-18).

Observa-se que, para esta análise, foram retirados outliers das amostras em alguns casos. Adotou-se como critério para remoção de outliers uma distância da média superior a três desvios padrão. A presença de outliers nas medidas do ECG pode estar associada a falhas na captura dos dados durante o experimento.

Tabela 8-9. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Variáveis ECG.

	BPM p-value	RRi p-value	LnLF p-value	LnHF p-value	LF/HF p-value
Shapiro-Wilk	0,568	0,595	0,929	0,238	0,575
Bartlett Piloto	0,182	0,120	0,460	0,094	0,517
Bartlett Configuração	0,775	0,791	0,665	0,937	0,108
Outliers	1	1	0	1	4

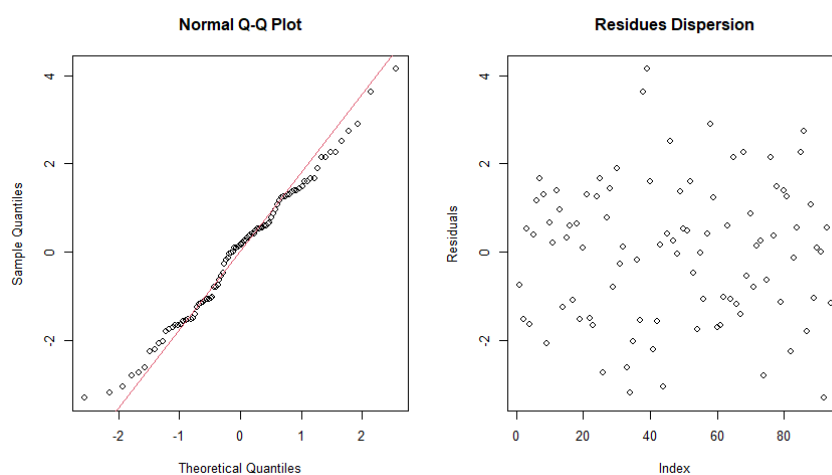


Figura 8-14. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável BMP.

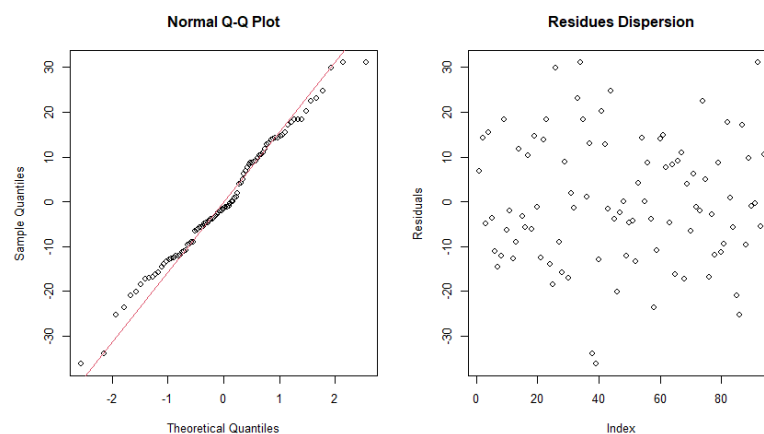


Figura 8-15. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável RRI

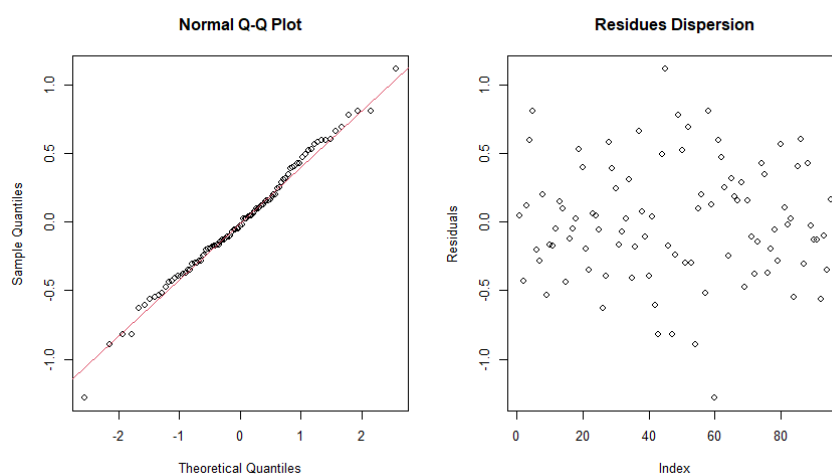


Figura 8-16. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LnLF

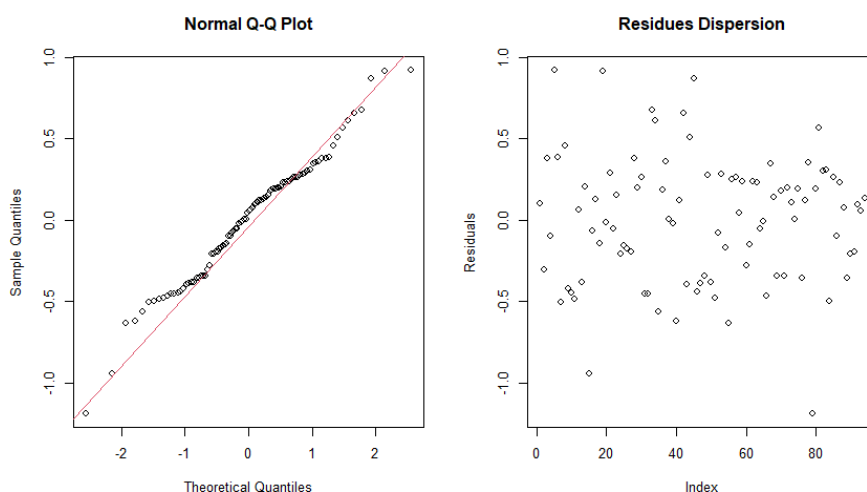


Figura 8-17. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LnHF.

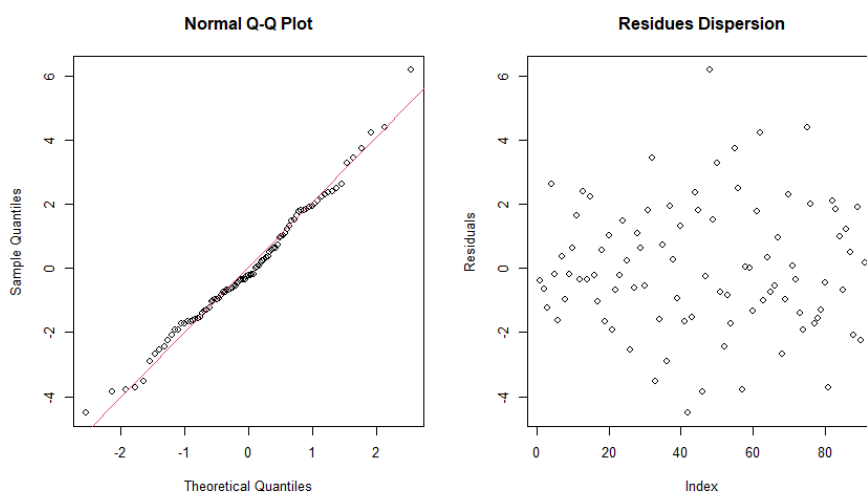


Figura 8-18. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável LF/HF.

Procedeu-se então a análise de variância. Os resultados obtidos para cada variável ECG são apresentados na Tabela 8-10. Como era esperado, o fator piloto novamente se mostrou influente. Além disso, com exceção da variável LnLF e LnHF, todas as demais variáveis ECG não apresentaram influência do fator configuração, indicando que o *stress* sentido pelo piloto não é afetado pelo treinamento. No entanto, ressalta-se que esse resultado era esperado, uma vez que se inclui no conjunto de dados os períodos de relaxamento.

Tabela 8-10. Análise de variância – Variáveis ECG.

	BPM p-value	RRi p-value	LnLF p-value	LnHF p-value	LF/HF p-value
Influência do piloto (fator P)	≈0	≈0	≈0	≈0	2,8E-09
Influência da configuração (fator C)	0,141	0,162	≈0	≈0	0,406
Influência da interação entre os fatores P e C	0,015	0,020	0,114	0,243	0,614

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados na sequência, a Tabela 8-11 apresenta o comportamento esperado de cada variável ECG numa situação de aumento de *stress*, de acordo referências da literatura (SHAFFER e GINSBERG, 2017). As variáveis BPM e RRi, calculadas no domínio do tempo, correspondem ao número de batimentos cardíacos por minuto e ao intervalo médio entre batimentos – são, portanto, variáveis com comportamento esperado oposto. De forma semelhante as variáveis LnLF e LnHF, calculadas no domínio da frequência, também costumam apresentar comportamento oposto, sendo que o efeito de ambas é acumulado na variável LF/HF.

Tabela 8-11. Impacto do aumento de stress nas variáveis ECG.

Variável	Impacto aumento de stress
BPM	Aumenta
RRi	Diminui
LnLF	Aumenta
LnHF	Diminui
LF/HF	Aumenta

A seguir, apresentam-se os boxplots de cada variável ilustrando a diferença entre as configurações SV, AR e LX.

No caso das variáveis BPM, observa-se que os períodos de relaxamento (LX) apresentam média de batimentos inferior aos períodos de treinamento, seja com a projeção da aeronave Líder em realidade aumentada (AR), seja com a projeção realizada pelo sistema visual do simulador (SV). Conforme esperado, a variável RRi apresenta o comportamento oposto, aumentando durante os períodos de relaxamento. No entanto, seja para variável BPM seja para RRi, pela análise dos boxplots, não é possível afirmar que existe diferença significativa entre as configurações AR e SV.

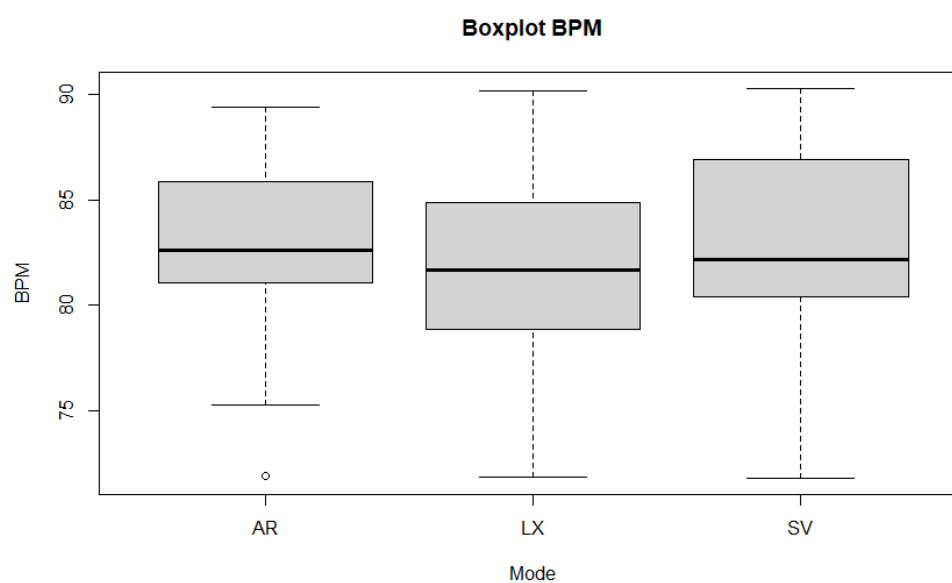


Figura 8-19. Boxplot para o fator C – Variável BPM.

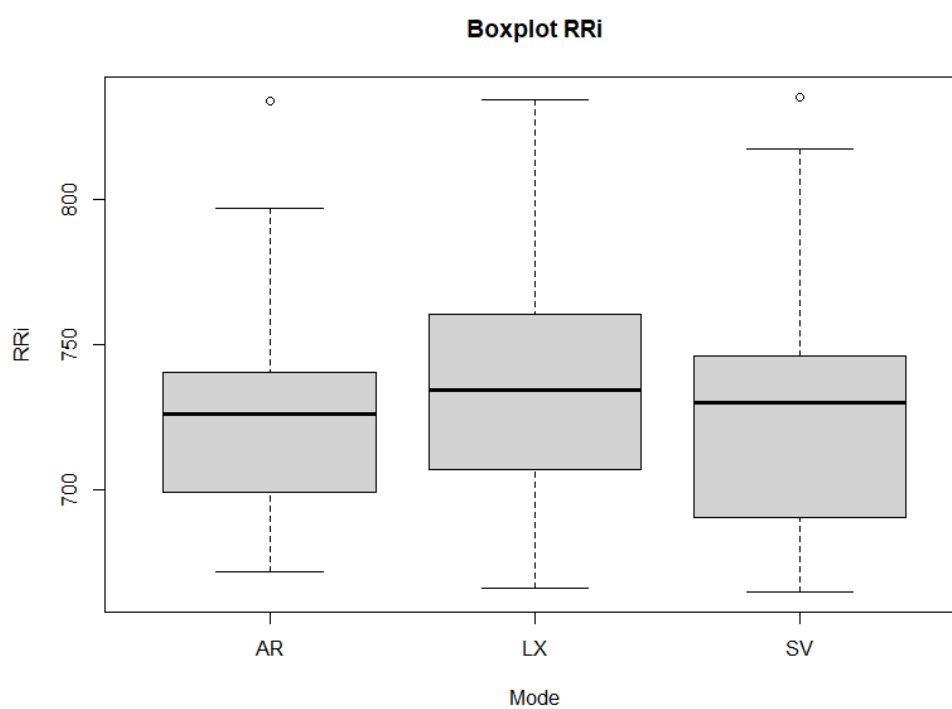


Figura 8-20. Boxplot para o fator C – Variável RRI.

A análise no domínio da frequência utiliza as variáveis LnLF, LnHF e LF/HF, cujos boxplots são apresentados na Figura 8-21, na Figura 8-22 e na Figura 8-23. Observa-se que, diferentemente do esperado a variável LnLF aumenta durante o período de relaxamento, sugerindo um aumento do *stress*, ao contrário do que foi constatado para variáveis BPM e RRi. Por outro lado, a variável LnHF também aumenta durante o período de relaxamento, quando deveria apresentar o comportamento oposto. Já a variável LF/HF não varia de forma significativa entre as três configurações, consistente com o alto *p-value* apresentado na Tabela 8-10. Uma possível justificativa para a inconsistência dos resultados no domínio da frequência é o fato dos intervalos utilizados serem de pequena duração (cerca de 3 min).

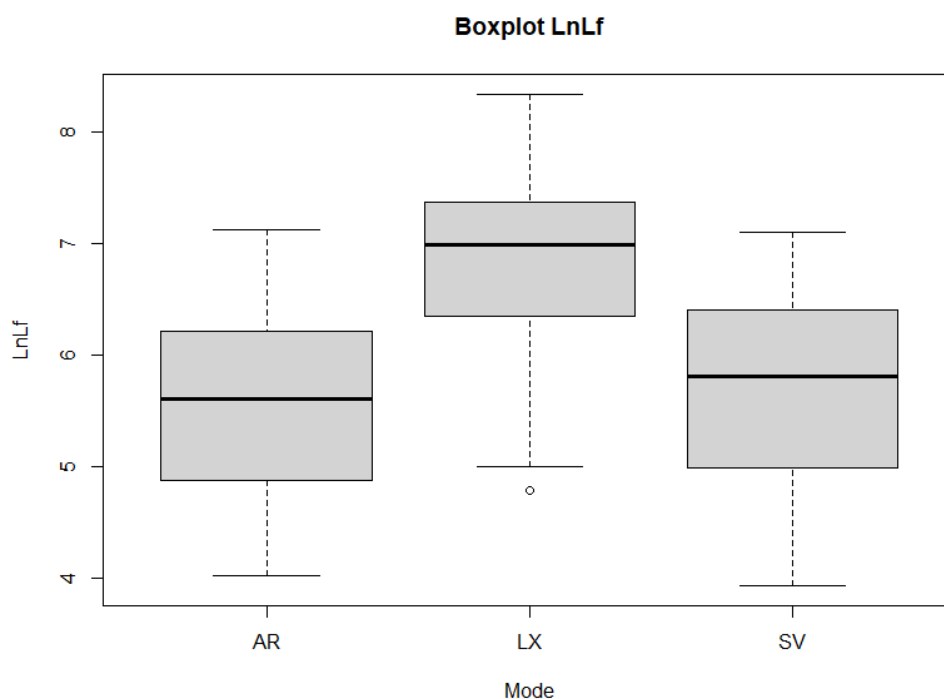


Figura 8-21. Boxplot para o fator C – Variável LnLF.

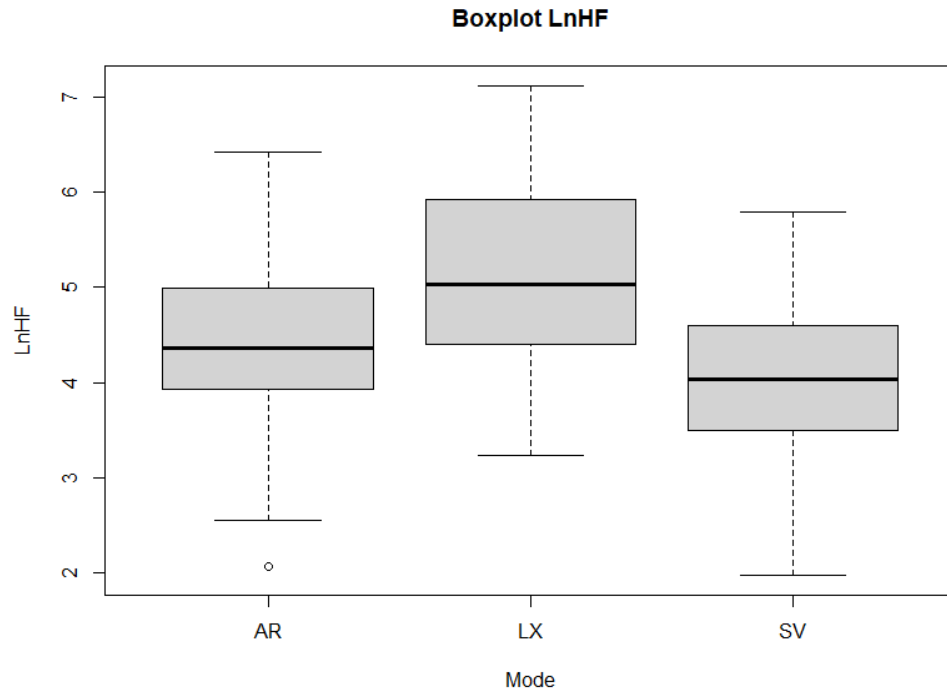


Figura 8-22. Boxplot para o fator C – Variável LnHF.

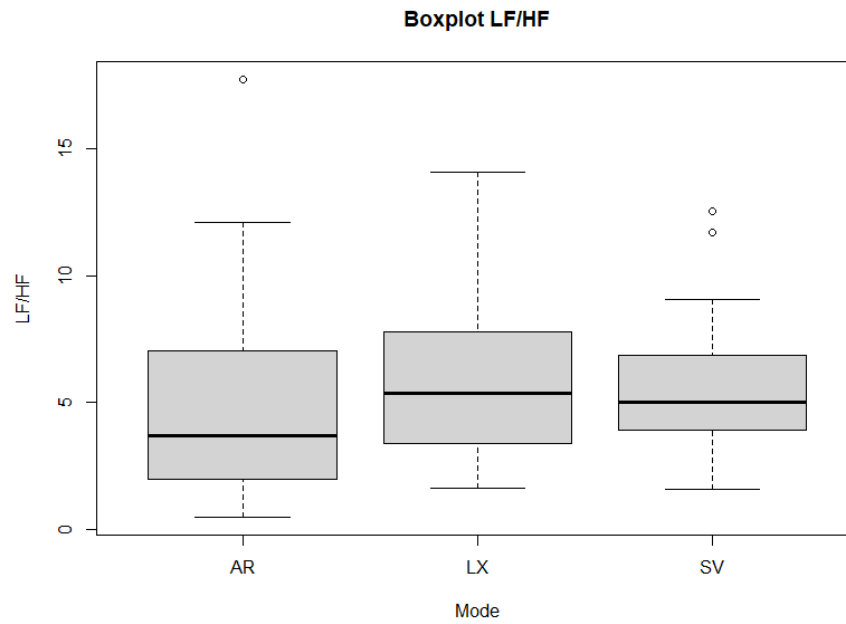


Figura 8-23. Boxplot para o fator C – Variável LF/HF.

Para finalizar a análise do batimento cardíaco, comparam-se as configurações duas a duas, utilizando o teste de Tukey. Os resultados são apresentados na Tabela 8-12. As variáveis BPM e RRI não apresentaram diferença significativa entre as configurações, dentro do intervalo de significância adotado. No entanto, observa-se que o *p-value* apresenta um valor bem superior, acima de 0,9, para a comparação entre as configurações referentes ao treinamento com e sem realidade aumentada. Por outro lado, quando o período de relaxamento é comparado com os períodos de treinamento, os valores de *p-value* estão mais próximos do limite adotado de 0,1. Conclui-se, a partir dessas variáveis, que não existe diferença significativa entre as configurações AR e SV.

Para a análise no domínio da frequência, a variável LnLF apresenta o comportamento esperado, indicando que não existe diferença entre AR e SV, mas ambas são significativamente diferentes de LX. Já a variável LnHF e, por consequência, também LF/HF novamente apresentam um comportamento diferente do esperado.

Tabela 8-12. Teste de Tukey– Variáveis ECG.

Tukey	BPM	RRI	LnLF	LnHF	LF/HF
RA-SV	0.938	0.974	0.965	0.075	0.597
LX-SV	0.166	0.205	≈0	≈0	0.965
LX-RA	0.318	0.309	≈0	≈0	0.390

8.4.2 GSR

A partir do sinal obtido do GSR, calcula-se a variável de média do sinal, que pode ser associada ao *stress* sentido pelo piloto em cada uma das situações.

Como para as demais variáveis, iniciou-se o processamento do sinal pela análise de normalidade e homogeneidade de variâncias, contudo os valores nominais falham nos dois sentidos, sendo corrigidos através de uma transformação logarítmica similar à utilizada em LnLF e LnHF. A partir da transformação, o teste de Shapiro-Wilk apresentou *p-value* dentro do esperado. Já, o teste de Bartlett apresentou *p-value* abaixo do limite de significância estabelecido de 0,05 para a variável piloto (Tabela 8-13). Apesar disso, o gráfico de dispersão de resíduos não apontou concentração anormal de resíduos e o gráfico normal Q-Q comprovou a normalidade (Figura 8-24). Uma vez que o interesse da análise está no fator configuração, que apresentou *p-value* dentro do limite estabelecido para o teste de Bartlett, prosseguiu-se com a análise.

Tabela 8-13. Análise de normalidade e homogeneidade de variâncias – Variável GSR.

Teste	GSR p-value
Shapiro-Wilk	0,976
Bartlett Piloto	0,006
Bartlett Configuração	0,973
Outliers	0

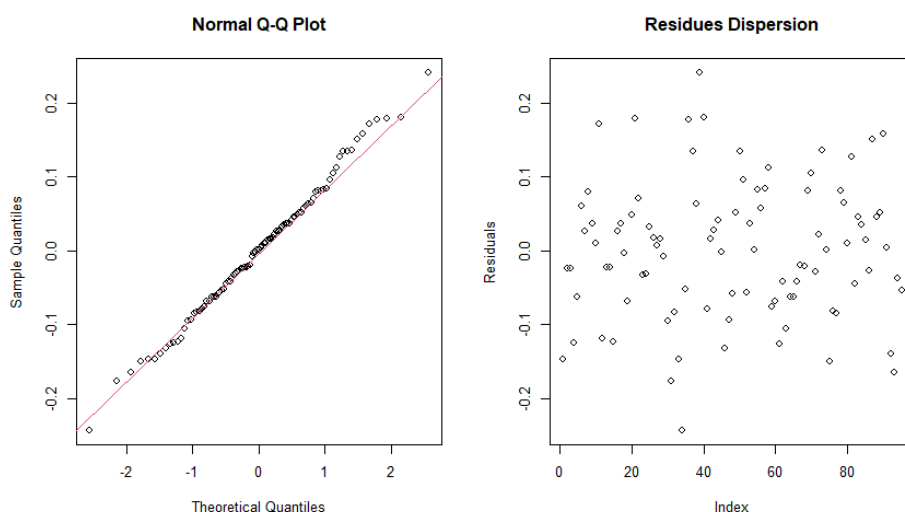


Figura 8-24. Dispersão de resíduos e Normal Q-Q – Variável GSR.

A análise do *Boxplot* para variável *GSR* (Figura 8-25) não apresentou diferença significativa entre as configurações analisadas, incluindo o relaxamento. Essa observação é confirmada pelo resultado ANOVA, apresentado na Tabela 8-14. Por outro lado, o fator piloto e a interação entre os fatores piloto e configuração mostraram-se significantes.

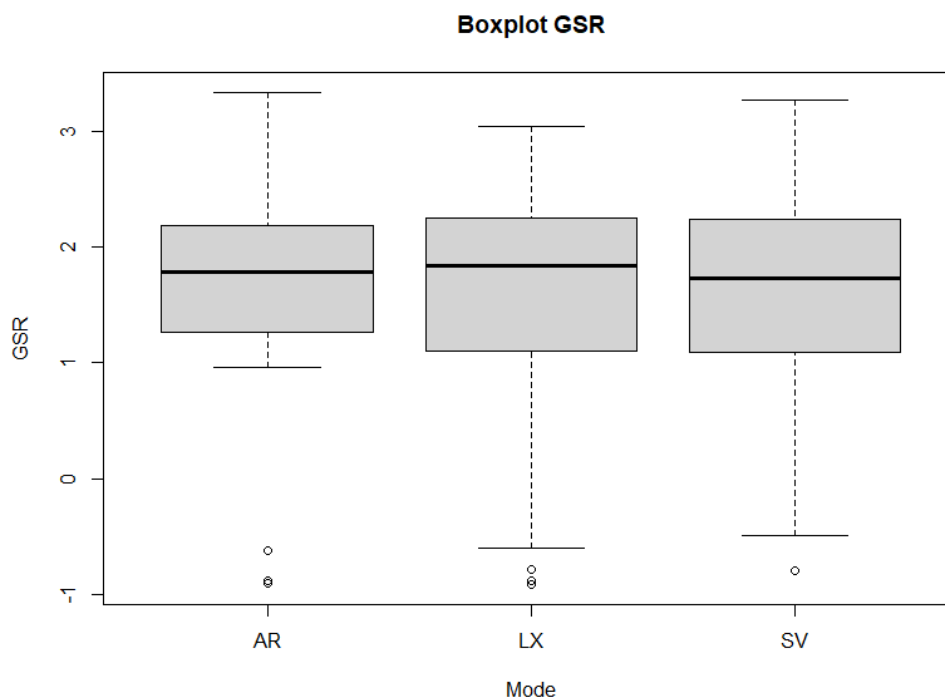


Figura 8-25. Boxplot para o fator C – Variável GSR.

Tabela 8-14. Análise de variância – Variável GSR.

	GSR p-value
Influência do piloto (fator P)	≈0
Influência da configuração (fator C)	0,115
Influência da interação entre os fatores P e C	4,88E-05
Outliers	0

A comparação dois a dois das configurações apresentou um resultado bastante semelhante ao obtido para as variáveis BPM e RRi do batimento cardíaco. Conforme pode ser observado na Tabela 8-15, obteve-se *p-value* superior a 0,9 para a comparação entre duas configurações referentes ao treinamento com e sem realidade aumentada. Por outro lado, a comparação entre os períodos de relaxamento e os períodos de treinamento resultou em *p-values* mais próximos do limite de significância estabelecido.

Tabela 8-15. Teste de Tukey – Variável SCR.

Tukey	GSR p-value
AR-SV	0,915
LX-SV	0,133
LX-AR	0,298

8.4.3 Análise da hipótese H₄

A partir da análise dos sinais dos sensores ECG e GSR, avalia-se a hipótese H₄:

- *H₄ - O stress do piloto não depende da configuração utilizada*

Para avaliação do *stress* induzido pelo treinamento, comparou-se os sinais coletados dos sensores fisiológicos não apenas durante os períodos de treinamento de voo em formação usando as duas configurações (com e sem realidade aumentada), mas também durante os períodos intermediários entre os treinamentos, considerados períodos de relaxamento onde o piloto automático do simulador SIVOR assumia o controle da aeronave.

A análise ANOVA para as variáveis calculadas a partir do sinal do ECG no domínio do tempo (BPM e RRi) indicou que não existe diferença entre os três períodos (treinamento com realidade aumentada, treinamento sem realidade aumentada e relaxamento). A comparação dois a dois aponta para uma diferença mais significativa entre os períodos de treinamento e o período de relaxamento, sendo que não foi evidenciada diferença entre o treinamento com e sem realidade aumentada. A análise das variáveis ECG no domínio da frequência não foi conclusiva. Já a análise do sinal capturado pelo sensor GSR apresenta um resultado semelhante ao das variáveis do ECG no domínio do tempo.

Apesar dos *p-values* obtidos não se encontrarem sempre dentro dos limites de significância estabelecidos, os resultados obtidos sugerem que a inserção dos óculos de realidade aumentada não se apresenta como um estressor significativo. Portanto não se refuta a hipótese H₄.

8.5 Análise da transferência de treinamento

Esta seção avalia a transferência de treinamento obtida durante a primeira parte do experimento, onde cada voluntário utiliza apenas uma configuração para treinamento. A análise é realizada por meio da comparação entre a performance no início do experimento e a performance ao final da primeira parte do experimento.

8.5.1 Performance no início e no final do treinamento

De forma semelhante ao realizado na Seção 8.2, consideram-se três variáveis para análise da performance no início e no final do treinamento: a distância média entre as aeronaves Líder e Ala (MeanMod), o desvio padrão da distância média (StdMod) e o tempo em formação a menos de 250 m (T250).

A Tabela 8-17 apresenta a distância média entre as aeronaves Líder e Ala no período inicial do treinamento (MeanMod_{Ini}) e no período final (MeanMod_{End}), para cada piloto. Apresenta-se também a diferença entre as médias (DiffMeanMod), que indica a melhora de performance obtida durante o período de treinamento. Observa-se que, com exceção do Piloto 7, todos os pilotos apresentaram uma melhora no desempenho.

Os dados são submetidos a testes de normalidade. A Tabela 8-16 resume os resultados para as diferenças calculadas, atestando caráter normal e com homogeneidade de variâncias:

Tabela 8-16. Testes de normalidade e Homogeneidade de Variâncias dos dados

	MeanModDiff	StdModDiff	T250Diff
Shapiro-Wilk	0,2927	0,2945	0,081
Bartlett	0,7374	0,3104	0,554

Tabela 8-17. Distância média entre as aeronaves, em metros – Variável MeanMod.

Piloto	Treino	MeanMod _{Ini}	MeanMod _{End}	DiffMeanMod
1	AR	845,82	235,08	-610,74
2	AR	202,07	196,51	-5,56
3	AR	680,89	351,22	-329,68
4	AR	730,63	256,58	-474,05
5	AR	2463,88	1392,85	-1071,03
6	SV	321,99	175,73	-146,26
7	SV	250,41	345,83	95,42
8	SV	675,72	208,72	-466,99
9	SV	191,53	129,94	-61,59
10	SV	1494,81	410,24	-1084,57

A melhora de desempenho entre início e fim é comprovada pelo resultado dos testes-t, apresentados na Tabela 8-18, que indicam diferença significativa entre o desempenho no início e o desempenho no final do treinamento. Por outro lado, a comparação entre os ganhos de performance obtidos com as duas configurações AR e SV não indica diferença significativa, sugerindo que as duas configurações são semelhantes.

Tabela 8-18. Teste-t entre momentos – Variável MeanMod.

Teste	<i>p-value</i>
MeanMod _{Ini} (AR) – MeanMod _{End} (AR)	0,023
MeanMod _{Ini} (SV) – MeanMod _{End} (SV)	0,093
DiffMeanMod(AR) – DiffMeanMod(SV)	0,561

Os valores referentes ao desvio padrão da distância média entre as aeronaves Líder e Ala (StdMod) são apresentados na Tabela 8-19. Observa-se que, com exceção do Piloto 2, todos os demais pilotos apresentaram uma redução do desvio padrão, o que indica uma melhora na performance. Os resultados dos testes-t são apresentados na Tabela 8-20. Neste caso, o *p-value* para a configuração com realidade aumentada (AR) apresentou-se um pouco acima do limiar de significância estabelecido. No entanto, a comparação entre o ganho obtido com cada configuração (DiffStdMod) indica que não há diferença significativa entre as configurações.

Tabela 8-19. Desvio padrão da distância, em metros – Variável StdMod.

Piloto	Treino	StdMod _{Ini}	StdMod _{End}	DiffStdMod
1	AR	652,536	47,357	-605,179
2	AR	14,245	16,694	2,449
3	AR	273,450	174,503	-98,948
4	AR	58,793	177,552	118,759
5	AR	269,509	118,384	-151,125
6	SV	272,936	32,588	-240,349
7	SV	133,416	20,590	-112,826
8	SV	47,649	24,134	-23,515
9	SV	28,859	13,199	-15,660
10	SV	420,635	29,753	-390,883

Tabela 8-20. Testes-t do desvio padrão – Variável StdMod.

Teste	p-value
StdMod _{Ini} (AR) – StdMod _{End} (AR)	0,150
StdMod _{Ini} (SV) – StdMod _{End} (SV)	0,046
DiffStdMod(AR) – DiffStdMod(SV)	0,947

Para finalizar a análise da transferência de treinamento, a Tabela 8-21 apresenta o tempo em formação durante as etapas iniciais (T250_{Ini}) e finais (T250_{End}) do treinamento para as duas configurações, assim como a diferença entre eles. Novamente, é possível confirmar a melhora de performance da maioria dos pilotos. Essa observação é confirmada pelos resultados dos testes-t, apresentados na Tabela 8-22. De forma semelhante às demais variáveis de performance, não foi possível observar diferença significativa entre os ganhos de performance obtidos com cada configuração.

Tabela 8-21. Tempo em formação, em segundos – Variável T250.

Piloto	Treino	T250 _{Ini}	T250 _{End}	DiffT250
1	AR	25,626	60,002	34,376
2	AR	59,990	59,990	-0,001
3	AR	19,940	46,206	26,266
4	AR	0,000	48,901	48,901
5	AR	0,000	0,000	0,000
6	SV	42,950	59,976	17,026
7	SV	55,573	59,998	4,425
8	SV	0,000	59,995	59,995
9	SV	60,004	59,995	-0,009
10	SV	0,000	60,000	60,000

Tabela 8-22. Testes-t para o tempo de formação – Variável T250.

Teste	<i>p-value</i>
T250 _{Ini} (AR) – T250 _{End} (AR)	0,043
T250 _{Ini} (SV) – T250 _{End} (SV)	0,050
DiffT250(AR) – DiffT250(SV)	0,708

8.5.2 Análise da hipótese H₁

A partir da comparação entre a performance dos pilotos no início e no final do treinamento, avalia-se a hipótese H₁:

- ***H₁ - A transferência de treinamento não depende da configuração utilizada***

Considerando um nível de confiança de 10%, os resultados obtidos a partir dos testes-t uni caudais indicam que o treinamento em ambas as configurações desenvolve a habilidade do piloto. A única exceção foi para o desvio padrão do treinamento com realidade aumentada, que, apesar de próximo do nível de confiança adotado, não pôde ser confirmado pois apresentou um *p-value* um pouco superior.

Além disso, a comparação entre os resultados obtidos com cada configuração indica, para todas as variáveis consideradas, que não existem diferenças significativas entre os dois tipos de treinamento.

Considera-se, portanto, que os resultados obtidos confirmam a hipótese H_1 .

8.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados obtidos a partir da realização do experimento proposto no Capítulo 7 com um conjunto de 10 voluntários. Os dados apresentados foram testados quanto a normalidade e homogeneidade de variâncias, e em sua grande maioria se mostraram aderentes às premissas de uso dos testes ANOVA. O nível de confiança considerado foi elevado de 5% para 10% devido ao limitado número de pilotos e a heterogeneidade da amostra.

Entre as quatro hipóteses colocadas, os dados coletados durante o experimento permitem confirmar duas delas e refutar as outras duas. No que se refere a performance do piloto (hipótese H_2), observa-se uma diferença significativa na distância mantida entre a aeronave Ala e Líder, refutando a hipótese de que o uso de realidade aumentada não interfere na performance. No que se refere a carga de trabalho percebida pelo piloto (hipótese H_3), os resultados do questionário *NASA-TLX* indicam um aumento da carga com o uso da realidade aumentada durante o treinamento. No que se refere ao *stress* (hipótese H_3), os dados coletados pelos sensores fisiológicos ECG e *GSR* não indicam diferença significativa entre as formas de treinamento. Para finalizar, a comparação entre a evolução da performance no treinamento com e sem realidade aumentada permite afirmar que a transferência de treinamento não é significativamente diferente para as duas configurações (hipótese H_1).

9 Conclusão

Este capítulo discute as principais contribuições desta tese, frente aos objetivos propostos e aos resultados obtidos, e apresenta propostas para evolução da pesquisa em trabalhos futuros.

De forma geral, esta tese caracteriza-se pela proposta de uso de realidade aumentada em voo para criação de cenários de treinamento. Esta proposta baseia-se na hipótese, confirmada por meio de revisão bibliográfica, de que existe diferença entre o treinamento em simulador e o treinamento em voo real, justificando assim o treinamento em voo real em complemento ao treinamento em simulador.

Dentre os vários tipos de treinamento que poderiam ser realizados utilizando realidade aumentada, selecionou-se o voo em formação para investigação nesta tese. Conforme os dados coletados em uma campanha de voo, esse tipo de treinamento requer que o piloto mantenha sua atenção fixa na aeronave Líder. De acordo com a proposta apresentada, ao invés de se utilizar uma aeronave Líder real, a mesma seria representada por meio de um dispositivo de realidade aumenta, permitindo assim reduzir o custo do treinamento e aumentar a segurança, uma vez que o risco de colisão entre as aeronaves em voo é eliminado.

Como etapa necessária para viabilizar a proposta de uso de realidade aumentada em voo, esta tese se propõe a avaliar o impacto sobre o piloto da introdução do sistema de realidade aumentada. Para tanto, considerou-se a realização de experimentos em um ambiente de simulação, onde compara-se o treinamento do voo em formação com a aeronave Líder projetada por óculos de realidade aumenta com o caso da aeronave Líder projetada pelo sistema visual do simulador.

Como contribuição desta tese, destaca-se o desenvolvimento de um protótipo de sistema de realidade aumentada integrado ao simulador de voo SIVOR, disponível no Centro de Competência em Manufatura (CCM) do ITA. O protótipo desenvolvido caracteriza-se pelo desenvolvimento de três sistemas: (a) um *plug-in* para o sistema visual do simulador, com objetivo de permitir a visualização da aeronave Líder utilizando o próprio sistema visual do simulador; (b) um sistema de realidade aumentada, baseado no uso dos óculos *Hololens*, com comunicação *wi-fi* para a distribuição de dados; e (c) um sistema supervisor central, responsável pelos cálculos matemáticos e geração da trajetória, diminuindo assim a carga de processamento a ser embarcada nos óculos.

Para o desenvolvimento do protótipo de sistema de realidade aumentada, foi necessária a atualização do sistema visual do simulador SIVOR, de tal forma a corrigir problemas relacionados ao campo de visão, *blending* e *warping* de imagem, acesso, *hardware* de comunicação, entre outros, sendo esta também uma contribuição secundária deste trabalho.

No desenvolvimento do protótipo de sistema de realidade aumentada, foram avaliadas diferentes soluções para o referenciamento da posição do piloto em relação ao *cockpit* da aeronave, incluindo métodos de posicionamento padrão, reconhecimento utilizando marcadores e reconhecimento ambiental baseado em imagens. A solução adotada combina o posicionamento padrão com um sistema de calibração manual, onde o piloto ajusta o posicionamento de uma máscara (imagem holográfica do *cockpit*) para sobrepor-la ao *cockpit* real do simulador SIVOR. Essa solução apresentou uma performance adequada, apesar das limitações de precisão de posicionamento e profundidade dos óculos de realidade aumentada.

Salienta-se, ainda, que os óculos de realidade aumentada utilizados nesta tese não se mostraram adequados para uso em voo real devido a combinação da dinâmica de movimento do piloto dentro da cabine com a dinâmica da própria aeronave, o que gera confusão e sobrecarga de processamento para o sistema de realidade aumentada. No entanto, tem-se observado uma rápida evolução da tecnologia utilizada nesses dispositivos, sendo que trabalhos publicados recentemente com novas versões dos óculos permitem supor que este desafio pode ser transposto utilizando técnicas de posicionamento global, fusão sensorial de dados e sistemas de sensoriamento externos.

Para finalizar, o protótipo desenvolvido permite diferentes formas de geração da trajetória da aeronave Líder, incluindo aquela explorada neste trabalho, que consiste em reproduzir o mesmo voo da aeronave Líder seja utilizando o sistema visual do simulador seja utilizando os óculos de realidade aumentada, contribuindo para uma análise baseada em situações homogêneas. A flexibilidade na geração do voo da aeronave Líder permite que o protótipo desenvolvido seja explorado em trabalhos futuros, incluindo a realização de experimentos utilizando rotinas de inteligência artificial para definição do comportamento da aeronave Líder ou ainda a integração de um piloto real no *loop* de simulação da aeronave Líder, caracterizando uma configuração *multiplayer*. Além disso, o protótipo pode ser facilmente adaptado para avaliação do uso de realidade aumentada em outros tipos de treinamento.

Para avaliar o impacto sobre o piloto da introdução do sistema de realidade aumentada propõe-se a análise de um conjunto de fatores a partir de experimentos realizados no simulador SIVOR. Os fatores considerados incluem aspectos relacionados a carga de trabalho, *stress*, performance e transferência de treinamento. Utilizam-se como medidas para avaliação dos

fatores dados coletados dos sistemas de voo, assim como dados obtidos a partir sensores fisiológicos e questionários subjetivos. A diversidade das medidas utilizadas permite capturar sensações físicas e emocionais do piloto, capazes de influenciar o desempenho e a tomada de decisão na execução de determinadas tarefas.

A partir dos fatores selecionados (transferência de treinamento, performance, carga de trabalho e *stress*), definem-se quatro hipóteses, que correspondem a ausência de influência do sistema de realidade aumentada sobre esses fatores. Em outras palavras, investiga-se a hipótese de que a introdução do sistema de realidade aumentada no treinamento do voo em formação não afeta os fatores selecionados.

Para avaliar as hipóteses, propõe-se um projeto de experimento composto de duas etapas. A primeira etapa fornece uma linha indicativa da evolução da performance do piloto ao longo de um treinamento, considerando que cada piloto utiliza apenas uma configuração de ambiente de treinamento (com ou sem realidade aumentada). A segunda etapa do projeto de experimento inclui a comparação, para cada piloto, das duas configurações, por meio do treinamento alternado em ambas as configurações, intercalado com períodos de relaxamento.

O experimento foi realizado com um conjunto de 10 voluntários. Para permitir um aprendizado inicial alto e, desta forma, reduzir a duração do experimento, optou-se por utilizar um grupo de voluntários amadores, bastante heterogêneo e sem experiência em voos de formatura.

Os resultados obtidos a partir da análise dos dados coletados confirmaram duas das hipóteses colocadas e refutaram as outras duas.

O uso de realidade aumentada apresentou influência na performance dos pilotos, no que se refere a capacidade de manter uma determinada distância do Líder. Refuta-se assim a hipótese que a performance do piloto não é afetada pelo uso da realidade aumentada. No entanto, observa-se que outras métricas de performance, como o tempo em formação, não foram afetadas pela presença dos óculos. Vale ainda salientar que a interação entre piloto e a configuração do sistema de treinamento também se mostrou significativa.

Outra hipótese refutada refere-se à carga de trabalho. Os resultados obtidos a partir do questionário *NASA-TLX* mostram um claro aumento de carga com o uso dos óculos. Este aumento pode ser devido ao campo de visão limitado dos óculos, ao uso de lentes escuras ou ainda a diferença de brilho e luminosidade do holograma projetado quando comparado com a imagem disponibilizada pelo sistema visual do simulador. Ainda sobre a capacidade de projeção, a presença de luz solar em grande quantidade prejudica a sobreposição virtual, que é exclusivamente uma projeção estereoscópica em duas telas, dessa forma, a visibilidade dos

elementos virtuais é diretamente afetada pela potência dos projetores nos óculos. O aumento da carga de trabalho é um ponto a ser considerado em treinamentos que envolvam a execução de múltiplas tarefas, de tal forma a evitar a degradação da performance do piloto em tarefas secundárias devido a sua sobrecarga.

Do ponto de vista fisiológico, foram observadas alterações de *stress* entre períodos de relaxamento e momentos de execução dos voos em formação. Porém, não foram detectadas alterações significativas nos parâmetros coletados quando comparando as duas configurações de ambiente de treinamento (com e sem realidade aumentada), confirmando assim a hipótese colocada sobre a ausência de influência do sistema de realidade aumentada no *stress* do piloto. Observa-se que as variáveis calculadas no domínio do tempo a partir dos sinais de batimento cardíaco apresentaram resultados consistentes com o sinal coletado pelo sensor de resposta galvânica da pele. No entanto, as variáveis calculadas no domínio da frequência não se mostraram consistentes, o que pode ser consequência da pequena duração dos intervalos usados para análise.

No que se refere à transferência de treinamento, observou-se aprendizado com ambas as configurações de sistema de treinamento. Ao mesmo tempo, não foram detectadas diferenças significativas entre a melhora de performance nos dois sistemas, confirmando assim a hipótese relativa à transferência de treinamento.

Resumindo, conclui-se que o uso da realidade aumentada pode alterar de forma significativa a performance e a carga de trabalho do piloto. Além disso, a tecnologia, em seu estado atual, ainda apresenta limitações para uso em voo. Os resultados apresentados nesta tese, bem como o protótipo desenvolvido, podem ser entendidos como um *gateway* para a evolução do uso da tecnologia de realidade aumentada para fases mais avançadas, permitindo um mapeamento inicial dos pontos a serem levados em consideração em trabalhos futuros, de forma a viabilizar o uso da realidade aumentada para treinamento em voo.

9.1 Trabalhos Futuros

Utilizando os resultados desta tese, propõe-se como trabalho futuro a introdução de melhorias no sistema desenvolvido, seguindo uma determinada ordem evolutiva. Inicialmente propõem-se a atualização dos óculos de realidade aumentada utilizado (Hololens V1) para uma tecnologia mais avançada de realidade aumentada, com maior campo de visão, capacidade de processamento e precisão de posicionamento. Concomitante a isto, o desenvolvimento de técnicas e protótipos de posicionamento global e fusão de ambientes (real e virtual) devem ser estudados com dois objetivos: permitir uma melhoria de precisão no posicionamento dos hologramas e habilitar o uso dos óculos em ambientes dinâmicos.

A partir do momento em que o sistema for adequado para uso em ambientes dinâmicos, experimentos podem ser executados em cenários reais, permitindo extrapolação da tecnologia para outros tipos de situações, tais como: voo de combate, voo de resgate, voo de reconhecimento, entre outras missões que necessitem de elementos externos à aeronave para serem realizadas.

Melhorias ainda podem ser propostas no sensoriamento humano e nas técnicas de análise de stress e carga de trabalho, como a aplicação de tratamentos de dados mais robustos nas análises fisiológicas permitindo o cálculo das variáveis com maior confiabilidade.

Outras vertentes para trabalhos futuros que podem ser consideradas correspondem ao uso da realidade aumentada em diferentes tipos de meios de transporte, tais como o uso de um sistema similar desenvolvido para automóveis, permitindo desde o treinamento até a criação de sistemas de auxílio para o motorista.

É importante salientar que para experimentos futuros, em simulador ou ambiente real, uma amostra de pilotos mais homogênea e direcionada ao uso do sistema pode resultar numa análise mais direcionada para o público alvo do sistema. Propõe-se neste caso, o uso de cadetes em formação sem treinamento de voo em formação. Aliado a este fator, as tarefas executadas podem ser diversificadas para adequar o experimento ao processo já utilizado de treinamento.

Por último, uma evolução interessante a ser proposta é a aplicação multiplayer, com a aeronave líder sendo comandada por um piloto em solo, aumentando o grau de fidelidade do experimento quando comparado a um treinamento real.

10 Referências

- ALEXANDER, T. et al. **Enhancing Human Effectiveness through Embedded Virtual Simulation**. I/ITSEC Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2012.
- ALLERTON, D. **Principles of Flight Simulation**. 1. ed. West Sussex: Wiley, v. 1, 2009.
- ANAC. **IS Nº 91-003**. ANAC. São Paulo, p. 20. 2014.
- ANGUS, R.; LAWSON, B. D.; BASSO, J. E. **Tactile Situation Awareness System: Recent Developments for Aviation**. Human Factors and Ergonomics Society 2016 Annual Meeting. Washington DC: HFES. 2016.
- ARJONI, D. H. et al. **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FLIGHT PERFORMANCE UNDER WORKLOAD VARIATIONS**. 31st Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. Belo Horizonte, Brasil: ICAS. 2018. p. 1-9.
- ARJONI, D. H.; KRAEMER, A. D.; VILLANI, E. **Evolution of an Experiment to Assess Pilot Behaviour in Flight Simulators**. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba, Brasil: ABCM. 2017.
- ARJONI, H. D. et al. **Experimental Evaluation of the Human Performance on a RoboticFlight Simulator based on FOQA Parameters**. Aerospace Technology Conference 2016, Swedish Aerospace Technology in a Globalised World. Solna, Stockholm, Sweden: [s.n.]. 2016. p. 1-11.
- ARTHUR, J. J. et al. **A review of head-worn display research at NASA Langley Research Center**. SPIE Defense + Security. Baltimore: SPIE. 2015.
- ARTHUR, J. J. et al. **A review of head-worn display for the Next Generation Air Transportation System**. SPIE Optical Engineering, Baltimore, v. 56, Maio 2017.
- AUER, S. et al. **Comparison Between Virtual Reality and Physical Flight Simulators for Cockpit Familiarization**. MundC: Mensch und Computer. [S.l.]: [s.n.]. 2021.
- BCAA. **Aviation Safety Information Leaflet Formation Flying**. Belgian Civil Aviation Authority. [S.l.]. 2016.
- BELL, H. H.; WAAG, W. L. **Evaluating the Effectiveness of Flight Simulators for Training Combat Skills: A Review**. THE INTERNATIONAL JOURNAL OF AVIATION

PSYCHOLOGY, v. 8, n. 3, p. 223 - 242, 1998. ISSN https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0803_4.

BINET, L.; RAKOTOMAMONJY, T. Using Haptic Feedback for Obstacle Avoidance in Helicopter Flight. **Progress in Flight Dynamics, Guidance, Navigation, and Control**, 10, 2018. 47 - 70.

BLUME, B. D. et al. Transfer of Training: A Meta-Analytic Review. **Journal of Management**, julho 2010.

BOUCSEIN, W. **Electrodermal Activity**. 2ª. ed. New York: Springer, v. 1, 2012.

BRAITHWAITE, J. J. et al. **A Guide for Analysing Electrodermal Activity (EDA) & Skin Conductance Responses (SCRs) for Psychological Experiments**. University of Birmingham. Birmingham, p. 43. 2015.

BRILL, C. J.; LAWSON, B. D.; ANGUS, R. **Tactile Situation Awareness System (TSAS) as a Compensatory Aid for Sensory Loss**. Human Factors and Ergonomics Society 58th Annual Meeting. Chicago: SAGE Publications. 2014.

BÜRKI-COHEN, J.; GO, T. H. **The Effect of Simulator Motion Cues on Initial Training of Airline Pilots**. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. San Francisco: AIAA. 2005. p. 12.

BÜRKI-COHEN, J.; SPARKO, A. L.; BELLMAN, M. **Flight Simulator Motion Literature Pertinent to Airline-Pilot Recurrent Training and Evaluation**. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Portland: AIAA. 2011. p. 17.

CAUDELL, P. T.; MIZELL, D. **Augmented reality**: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences. Kauai: [s.n.]. 1992.

COLLINS AEROSPACE. Collins Aerospace, 2019. Disponível em: <https://www.rockwellcollins.com/>. Acesso em: 10 Outubro 2019.

COOPER, G. E.; HARPER, R. P. The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities. **NASA Technical Note TN D5153**, 1969.

CSHS CENTRE FOR STUDIES ON HUMAN STRESS. CSHS Centre for Studies on Human Stress, 2 setembro 2020. Disponível em: <https://humanstress.ca/>.

CUNNINGHAM, L. B. et al. **Gyroscopically controlled gunsight**. US2527245A, 17 Março 1944.

DICKSTEIN, C. Air Force instructor, student pilot killed in T-38 crash at Vance Air Force Base. **Stars and Stripes**, 2019. Disponível em: <<https://www.strips.com/news/us/air-force-instructor-student-pilot-killed-in-t-38-crash-at-vance-air-force-base-1.608352>>. Acesso em: 15 dezembro 2019.

ENDSLEY, M. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. **Human Factors Journal**, Março 1995.

ENDSLEY, M. R. **Situation awareness in dynamic human decision making: theory and measurement**. University of Southern California. Los Angeles. 1990.

ENDSLEY, M. R. Measurement of situation awareness in dynamic systems. **Human Factors**, v. 37, n. 1, p. 65-84, 1995. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1518/001872095779049499>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ENDSLEY, M. R. Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design, Second Edition, 2011. Disponível em: <<https://amazon.com/designing-situation-awareness-approach-user-centered/dp/1420063553>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ENDSLEY, M. R. et al. Situation Awareness Information Requirements For Commercial Airline Pilots, 1998. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35929>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ENDSLEY, M. R.; SMOLENSKY, M. W. SITUATION AWARENESS IN AIR TRAFFIC CONTROL: THE PICTURE., 1998. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/581625>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

EPSON. Moverio BT-300 Especificações Técnicas, 2019. Disponível em: <<https://www.epson.pt/products/see-through-mobile-viewer/moverio-bt-300#specifications>>. Acesso em: 17 Novembro 2019.

FAA. **AC No: 20-167A**. FAA. Washington D.C. 2016.

FLAVIÁN, C.; IBÁÑEZ-SÁNCHEZ, S.; ÓRUS, C. The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. **Journal of Business Research**, v. 100, p. 547 - 560, 2019.

FOOTE, B.; MELZER, J. **A history of helmet mounted displays**. SPIE Defense + Security. Baltimore: SPIE. 2015.

FURNESS, T. A.; KOCIAN, D. F. **PUTTING HUMANS INTO VIRTUAL SPACE**. Proceedings of the Conference Aerospace Simulation II. San Diego: Soc for Computer Simulation. 1986. p. 214 - 230.

GAWRON, V. J. **Human Performance, Workload, and Situational Awareness Measures Handbook**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

GEMELLI, A. Sull' applicazione dei metodi psico-fisici all' esame dei candidati all' aviazione militare (On the application of psycho-physical methods of examining candidates as military pilots). **RISORSA UOMO**, 1917.

GODFROY-COOPER, M. et al. **Isomorphic spatial visual-auditory displays for operations in DVE for obstacle avoidance**. 44th European Rotorcraft Forum 2018, ERF 2018. [S.l.]: Netherlands Association of Aeronautical Engineers. 2018. p. 490-512.

GOOGLE. **Unlocking a screen using eye tracking information**. US8235529B1, 2012.

GOOGLE. Glass. **Glass**, 2019. Disponível em: <<https://www.google.com/glass/tech-specs/>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

GYRO Gunsight Mk IID. Direção: Royal Air Force. Produção: Science Films Ltd. London. [S.l.]: Australian War Memorial. 1944.

HART, S. G. **Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later**. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 904-908.

HART, S. G.; STAVELAND, L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. **Human Mental Workload**., 1988.

HAYS, R. T. et al. Flight Simulator Training Effectiveness: A Meta-Analysis. **Military Psychology**, v. 4, p. 63-74, 1992.

HENRIQSON, É. et al. Consciência situacional, tomada de decisão e modos de controle cognitivo em ambientes complexos. **Produção**, v. 9, p. 433 - 444, Dezembro 2009.

HEVNER, A. A Three Cycle View of Design Science Research. **Scandinavian Journal of Information Systems**, v. 19, 2006.

HIDALGO-MUÑOZ, A. R. et al. Cardiovascular correlates of emotional state, cognitive workload and time-on-task effect during a realistic flight simulation, 2018.

IMOTIONS. Galvanic Skin Response (GSR): The Complete Pocket Guide, agosto 2020. Disponivel em: <<https://imotions.com/blog/galvanic-skin-response/>>.

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

JONES, M. et al. **Analysis of Motion Parameter Variations for Rotorcraft Flight Simulators**. AHS International 73rd Annual Forum & Technology Display. [S.l.]: AHS. 2017. p. 23.

KRAEMER, A. D.; VILLANI, E.; ARJONI, H. D. Aircraft FDI and human factors analysis of a take-off manoeuvre using SIVOR flight simulator. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 34, p. 184-189, jan. 2019.

KRIJN, R.; WEDZINGA, G. **Development and in-flight demonstration of 'E-CATS', an experimental embedded training system for fighter aircraft**. National Aerospace Laboratory NLR. [S.l.], p. 25. 2004. (NLR-TP-2004-393).

LABEDAN, P. et al. **Virtual Reality for Pilot Training: Study of Cardiac Activity**. n Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. [S.l.]: [s.n.]. 2021.

LEE, A. T. **Flight Simulation: Virtual Environments in Aviation**. Nova York: Taylor & Francis Group, v. 1, 2016.

LEINO, T. **Neuroendocrine Responses to Psychological Workload of Military Flying**. Oulo: Oulu University Library, 1999.

LEMMERS, A. J. J. **An Embedded Training Multi-Ship Demonstrator**. National Aerospace Laboratory NLR. [S.l.], p. 17. 2008. (NLR-TP-2008-005).

LINK, E. A. **Combination Training Device for Student Aviators and Entertainment Apparatus**. US1825462A, 29 Setembro 1931.

MACFARLANE, P. W. et al. **Comprehensive Electrocardiology**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

MAGEE, L.; SOTTILARE, R.; ROESSINGH, J. J. **Human Interaction in Embedded Virtual Simulations**. ITEC. Cologne: ITEC. 2011.

MANSIKKA, et al. Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during an instrument flight rules proficiency test. **Applied Ergonomics**, 2016.

MARINESCU, A. et al. Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload. **Human Factors**, p. 31 - 56, 2018.

MASIERO, M. S. **Análise comparativa de dispositivos voltados ao desenvolvimento de soluções de realidade aumentada**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 39. 2019.

MATHWORKS. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), 2021. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/slam.htm>>. Acesso em: 15 Outubro 2021.

MAYER, K. Imagine Flying Blindfolded. **Navy Medicine**, Pensacola, v. 92, n. 5, p. 19-22, Setembro 2001.

MCCARTY, R. The Fight-or-Flight Response: A Cornerstone of Stress Research. In: _____ **Stress: Concepts, Cognition, Emotion, and Behavior - Handbook of Stress Series Volume 1**. [S.l.]: [s.n.], 2016. p. 33 - 37.

MCCLERNON, C. K. **Stress Training Efficacy in an Aviation Context**. International Symposium on Aviation Psychology. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

MCCLERNON, C. K. et al. Stress Training Improves Performance During a Stressful Flight. **Human Factors**, v. 53, n. 3, p. 207-218, junho 2011.

MCSPADDEN, R. What Went Wrong? Formation Flight Turns Tragic. **AOPA**, 2019. Disponível em: <<https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/december/pilot/what-went-wrong>>. Acesso em: dezembro 2019.

MICROSOFT. **HEADSET VISOR ENCLOSURE**. US D741,326S , 2015.

MICROSOFT. **VIRTUAL PLACE-LOCATED ANCHOR**. US 9,520,002 B1 , 2016.

MICROSOFT. HoloLens (1st gen) hardware, 2019. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens1-hardware>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

MILGRAM, P. et al. **Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. [S.l.]: [s.n.]. 1995.

MILLER, J. D. et al. **ARSAD: An Augmented-Reality Spatial Auditory Display for Obstacle Avoidance during all Phases of Flight**. AHS International 74th Annual Forum & Technology Display. Phoenix, Arizona: [s.n.]. 2018.

MIRANDA-CORREA, J. et al. AMIGOS: A Dataset for Affect, Personality and Mood Research on Individuals and Groups. **IEEE Transactions on Affective Computing**, 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8^a. ed. Nova Jersey: Wiley, v. 1, 2013.

MOREIRA, A. et al. **Experimental evaluation of the contribution of adding a motion system to an EDS**. Aerospace Technology Conference 2016, Swedish Aerospace Technology in a Globalised World. Solna, Stockholm, Sweden: [s.n.]. 2016. p. 1-10.

NICHOLL, R. J. Airline Head-Up Display Systems: Human Factors Considerations. **SSRN Electronic Journal**, 17 Fevereiro 2014. 33.

NOURBAKSH, ; WANG, ; CHEN,. **GSR and Blink Features for Cognitive Load Classification**. IFIP Conference on Human-Computer Interaction. [S.l.]: [s.n.]. 2013.

OLIVEIRA, W. R. D. et al. **Evaluation of the pilot perception in a robotic flight simulator with and without a linear unit**. AIAA SciTech Forum. San Diego: AIAA. 2019. p. 13.

ORITZ, G. A. Transfer of Learning Effectiveness: PC-Based Flight Simulation. **Journal of Aviation/Aerospace Education & Research**, v. 3, n. 2, p. 29-33, 1993.

PAAS, F.; VAN MERRIENBOER, J. The efficiency of instructional conditions: An approach to combine mental effort and performance measures. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, 1993. 737-743.

PEREZ, A. A.; BEHREND, F. **A holographic checklist assistant for the single pilot**. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, ICNS. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019.

POSSAMAI, J. O. B. **Aplicações de Realidade Aumentada em Voo Militar com Capitão Possamai IAOp**. São José dos Campos: ITA, 2 fevereiro 2020.

RAFI, M. et al. **Simulated flight testing of an adaptive loss-of-control avoidance pilot advisory display**. AIAA Scitech 2019 Forum. [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA. 2019.

RAJ, A. K. et al. **The Tactile Situation Awareness System in Rotary Wing Aircraft: Flight Test Results**. Current Aeromedical Issues in Rotary. San Diego: RTO. 1998.

RASMUSSEN, J. Skills, rules, and knowledge: signals, signs, and symbols and other distinctions in human performance models. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, p. 257-267, 1983. Acesso em: 16 nov. 2019.

RASMUSSEN, J.; PEJTERSEN, A. M.; GOODSTEIN, L. P. **Cognitive Systems Engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=i2xRAAAAMAAJ&q=10:+0471011983&dq=10:+0471011983&pgis=1>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

RED6. RED6. **RED6**, 2019. Disponível em: <<https://www.red6ar.com/>>. Acesso em: dez. 2019.

REID, G. B. Training Transfer of a Formation Flight Trainer. **Human Factors**, Outubro 1975. 470-476.

ROBINSON, A. D.; BICANIC, N. **Methods and Systems to Allow Real Pilots in Real Aircraft Using Augmented and Virtual Reality to Meet in a Virtual Piece of Airspace**. US 2019/0333396, 31 outubro 2019.

ROESSINGH, J. J. M. Transfer of Manual Flying Skills From PC-Based Simulation to Actual Flight—Comparison of In-Flight Measured Data and Instructor Ratings. **THE INTERNATIONAL JOURNAL OF AVIATION PSYCHOLOGY**, v. 15 (1), p. 67 - 90, 2005.

ROESSINGH, J. J. M.; VAN SIJLL, M. C.; JOHNSON, S. P. Embedded Training - An explorative study providing requirements for the display of virtual targets on a Helmet Mounted Display in simulated air-to-air engagements within visual range, Amsterdam, p. 54, 2003. ISSN NLR-TP-2003-262.

ROESSINGH, J. J. M.; VERHAAF, G. G. **Training Effectiveness of Embedded Training in a (Multi-) Fighter Environment A Discussion Paper**. National Aerospace Laboratory NLR. [S.l.], p. 8. 2009.

ROSCOE, A. H. Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration? **Biological Psychology**, p. 259-287, 1992.

ROSENBERG, L. B. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. **Virtual Reality Annual International Symposium**, p. 76–82, 1993. Acesso em: 16 nov. 2019.

SAAB. **Integrated HUD/EFVS System: Advanced Passive Milimeter Wave Sensor Technology**. SAAB. Estocolmo, p. 5. 2019.

SAFI, M.; PRADHAN, P.; CHUNG, J. Review of augmented reality in aerospace industry. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 91, n. 9, p. 1187 - 1194, outubro 2019. ISSN ISSN 0002-2667.

SAMSUNG. Galaxy S9 S9+. Sumsung, 2019. Disponível em: <<https://www.samsung.com/global/galaxy/galaxy-s9/specs/>>. Acesso em: 3 dezembro 2019.

SARTER, N. B.; AMALBERTI, R. **Cognitive Engineering in the Aviation Domain**. 1ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

SAVERN REWETI, A. G. L. J. Efficacy of low-cost PC-based aviation training devices. **Journal of Information Technology Education:Research**, v. 16, n. 1, p. 127-142, Março 2017. ISSN DOI: 10.28945/3682.

SELYE, H. Stress and the General Adaptation Syndrome. **British Medical Journal**, 17 junho 1950.

SHAFFER, F.; GINSBERG, J. P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. **Frontiers in Public Health**, 28 Setembro 2017.

SHI, Y. et al. **MULTIMODAL HUMAN-MACHINE INTERFACE AND USER COGNITIVE LOAD MEASUREMENT**. IFAC Proceedings Volumes. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 200 - 205.

SPITZER, ; FERRELL, U.; FERRELL, T. **Digital Avionics Handbook**. 3ª. ed. Boca Raton: CRC Press, v. 1, 2017.

SUTHERLAND, I. E. **A head-mounted three dimensional display**. Fall Joint Computer Conference. San Francisco: ACM. 1968. p. 757 - 764.

TASK GROUP HFM-165. **Improving Human Effectiveness Through Embedded Virtual Simulation**. [S.l.]: OTAN, 2014.

TELFER, R. **Aviation instruction and training**. [S.l.]: Routledge Revivals, 1993.

TOBII PRO INSIGHT. **Visual Performance in the Foundry**. Tobii. [S.l.]. 2019.

VALVERDE, H. H. A Review of Flight Simulator Transfer of Training Studies. **Human Factors**, Ohio, v. 15, n. 6, p. 512v - 522, Dezembro 1973. ISSN <https://doi.org/10.1177/001872087301500603>.

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

VINTAGE AVIATION. Supermarine-spitfire-gyro-gunsight-ggs-0005.. **Vintage Aviation**, 2019. Disponível em: <<https://vintageaviation.fi/other-parts/supermarine-spitfire-gyro-gunsight-ggs-0005/>>. Acesso em: 10 nov. 2019.

WALKO, C.; MAIBACH, M.-J. **Flying a helicopter with the HoloLens as head-mounted display**. Proceedings Volume 11759, Virtual, Augmented, and Mixed Reality (XR) Technology for Multi-Domain Operations II. [S.l.]: SPIE. 2021.

WEDZINGA, G. E-CATS: First time demonstration of embedded training in a combat aircraft. **Aerospace Science and Technology**, v. 10, p. 73-84, Setembro 2005.

WOOD, M. E. et al. **Design of the Simplified Formation Trainer**. Defense technical Information Center. Ohio, p. 36. 1972. (AD0754973).

WOODS, D. D.; HOLLNAGEL, E. **Joint cognitive systems**: Patterns in cognitive systems engineering. 1ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

YU, X.; ZHOU, J. F.; LI, C. A constrained differential evolution algorithm to solve UAV path planning in disaster scenarios. **Knowledge-Based Systems**, 27 setembro 2020.

Apêndice 1

Este apêndice apresenta um resumo de técnicas e conceitos estatísticos utilizados durante a execução e a análise dos experimentos descritos (MONTGOMERY, 2013).

A1.1. ANOVA

Um teste de hipóteses é uma técnica estatística que permite comparação entre amostras ou populações, contudo, existem certas limitações quanto ao seu uso para análises que levem em conta um número maior de grupos ou fatores a serem analisados. Desta forma, a Análise de Variâncias é uma metodologia que pode ser utilizada para determinar a influência de fatores sobre a variância das amostras, permitindo entender, através de testes F, se determinado efeito pode influenciar o resultado final de um conjunto de dados.

É importante salientar que, assim como nos testes de hipótese que utilizam o teste F, pode-se aferir de maneira mais intuitiva o resultado das análises através do *p-value* referente ao valor de F. Esta medida calcula a probabilidade de a hipótese nula ser verdadeira, assim, como em um teste ANOVA as hipóteses podem ser resumidas por:

- Hipótese Nula: as variâncias testadas são iguais;
- Hipótese Alternativa: as variâncias testadas são diferentes.

Adotando-se um valor crítico, (normalmente utilizado como 5% ou $p\text{-value} < 0.05$), pode-se inferir a probabilidade de se errar ao descartar a Hipótese Nula. Como um valor de *p-value* menor que 0.05, a hipótese nula pode ser descartada com 95% de chance de acerto, dessa forma indicando que as variâncias testadas são diferentes entre si com 95% de confiança.

Ainda assim, o teste ANOVA possui duas condições para que possa ter precisão e fundamento estatístico. As amostras devem ter uma distribuição normal e as variâncias das amostras devem ser homogêneas. Para aferir estas condições, podem ser utilizados métodos gráficos ou analíticos.

A1.2. Teste de Normalidade Gráfico

Uma das maneiras de aferir se uma determinada distribuição é normal é compará-la à uma distribuição conhecidamente normal. Para fazer isso, pode-se criar um gráfico Quantil-Quantil, ou gráfico Q-Q, onde o eixo de Quantis teóricos (eixo horizontal) representa uma distribuição normal previamente conhecida e o eixo de Quantis de amostra, representa a distribuição experimental obtida. Para que a amostra experimental seja considerada normal, os pontos coletados devem estar o mais próximo possível de uma reta como acontece na Figura A1-1.

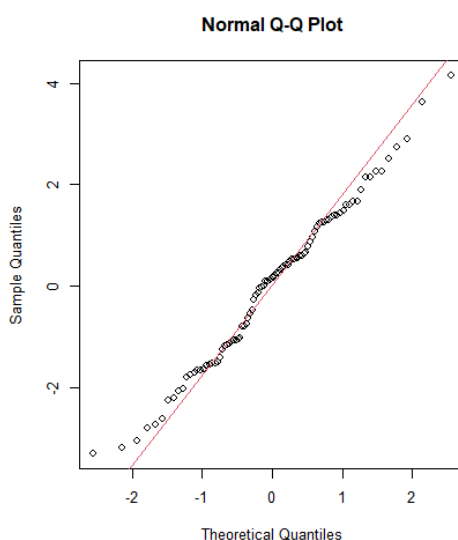


Figura A1-1. Exemplo de gráfico Q-Q.

A1.3. Teste de Normalidade Analítico

Outra forma de verificar a normalidade de uma amostra é através de um teste denominado Shapiro-Wilk, que é um teste de hipótese que determina a probabilidade de uma determinada amostra experimental ser compatível com uma amostra normal teórica. As hipóteses desta análise são:

- Hipótese Nula: as amostras são compatíveis e normais.
- Hipótese alternativa: as amostras não são compatíveis logo a amostra experimental não é normal.

Assim, para fundamentar o uso da ANOVA, o teste de Shapiro-Wilk deve apresentar p-values maiores ou iguais a 0.05

A1.4. Teste de Homogeneidade de Variâncias

Ainda que a ANOVA seja mais robusta à falta de homogeneidade de variâncias que à falta de normalidade de uma determinada amostra, a aferição deste parâmetro garante uma melhor confiança nos resultados das análises.

Um dos testes capazes de realizar esta verificação é o teste de Bartlett que analisa, através de um teste de hipóteses, as variâncias dentro das amostras e não entre fatores. Da mesma forma que o teste de Shapiro-Wilk, a resposta deste teste pode ser lida através do *p-value* final, que indica variâncias homogêneas se o valor for maior ou igual a 0.05.

Apêndice 2

Este apêndice apresenta os dados coletados e processados para realização das análises e também um resumo de técnicas estatísticas utilizadas ao longo do trabalho.

Tabela A2-1. Dados de performance calculados.

Piloto	Sistema	T500	T250	MeanMod	StdMod
1	B	130.16	60.42	375.13	187.13
1	B	129.41	99.69	496.93	526.21
1	B	60.28	39.70	710.28	376.14
1	A	37.61	33.05	723.01	446.48
1	A	59.91	37.47	986.01	617.13
1	A	52.98	41.46	1171.94	874.87
2	B	180.01	144.79	180.38	57.90
2	B	180.01	141.23	184.83	59.38
2	B	180.01	152.23	188.86	44.68
2	A	180.02	180.02	128.96	49.66
2	A	180.01	86.29	254.48	99.33
2	A	180.01	78.12	256.02	74.54
3	B	180.01	180.01	128.58	9.14
3	B	180.01	180.01	139.66	15.76
3	B	180.01	180.01	159.46	15.14
3	A	180.01	180.01	200.69	25.82
3	A	180.01	180.01	207.84	20.60
3	A	180.01	121.23	240.95	68.54
4	B	180.01	69.85	248.55	105.53
4	B	66.97	34.05	634.00	321.41
4	B	26.42	15.54	866.36	310.81
4	A	180.01	95.17	267.55	84.25
4	A	180.01	82.99	270.99	113.26
4	A	121.25	48.50	390.38	160.72
5	B	180.01	145.41	184.17	93.16
5	B	150.17	115.05	253.68	198.55
5	B	180.01	19.38	380.25	91.60
5	A	180.01	134.43	200.24	63.73
5	A	180.01	97.05	233.39	73.36
5	A	180.01	73.67	275.84	101.08

6	B	121.83	41.82	325.32	152.70
6	B	150.43	21.02	355.01	118.85
6	B	40.79	21.41	628.79	237.65
6	A	177.94	59.36	286.68	96.74
6	A	129.17	38.27	386.42	175.96
6	A	71.89	51.15	486.79	289.65
7	B	28.25	28.25	211.52	93.88
7	B	66.61	56.75	233.19	229.93
7	B	112.56	97.44	253.28	205.40
7	A	52.11	52.11	75.81	32.83
7	A	133.65	58.40	216.66	142.96
7	A	52.61	23.43	281.60	134.21
8	B	164.63	147.77	145.76	67.33
8	B	180.01	150.95	168.70	82.63
8	B	180.01	147.41	191.54	65.53
8	A	173.80	173.80	90.13	24.03
8	A	180.02	180.02	93.92	39.86
8	A	180.02	180.02	102.49	24.14
9	B	180.01	169.97	172.54	50.11
9	B	180.01	180.01	188.32	31.67
9	B	123.01	85.57	362.35	287.20
9	A	180.01	153.20	146.55	104.89
9	A	120.11	84.28	229.41	191.36
9	A	180.01	69.95	295.58	104.30
10	B	65.22	52.79	718.13	498.65
10	B	29.68	19.42	829.67	321.82
10	B	24.23	20.11	1461.53	740.66
10	A	180.01	40.15	308.53	90.23
10	A	157.31	36.13	338.44	118.71
10	A	128.39	61.85	383.89	211.55

Tabela A2-2. Dados do NASA-TLX.

P1 - Hololens				P1 - Projection			
	Rating	Tally	Weight		Rating	Tally	Weight
Mental Demand	70	5	0.33	Mental Demand	45	3	0.20
Physical Demand	60	1	0.07	Physical Demand	35	1	0.07
Temporal Demand	65	2	0.13	Temporal Demand	40	2	0.13
Performance	85	4	0.27	Performance	25	5	0.33
Effort	80	3	0.20	Effort	60	4	0.27
Frustration	75	0	0.00	Frustration	45	0	0.00
Overall	74.67			Overall	41		
P2 - Hololens				P2 - Projection			
	Rating	Tally	Weight		Rating	Tally	Weight
Mental Demand	85	3	0.20	Mental Demand	85	5	0.33
Physical Demand	75	0	0.00	Physical Demand	75	1	0.07
Temporal Demand	75	3	0.20	Temporal Demand	80	2	0.13
Performance	10	5	0.33	Performance	10	4	0.27
Effort	85	3	0.20	Effort	80	3	0.20
Frustration	20	1	0.07	Frustration	15	0	0.00
Overall	53.67			Overall	62.67		
P3 - Hololens				P3 - Projection			
	Rating	Tally	Weight		Rating	Tally	Weight
Mental Demand	60	4	0.27	Mental Demand	55	3	0.20
Physical Demand	20	0	0.00	Physical Demand	15	0	0.00
Temporal Demand	80	3	0.20	Temporal Demand	60	4	0.27
Performance	45	5	0.33	Performance	70	5	0.33
Effort	55	1	0.07	Effort	55	2	0.13
Frustration	70	2	0.13	Frustration	50	1	0.07
Overall	60			Overall	61		
P4 - Hololens				P4 - Projection			
	Rating	Tally	Weight		Rating	Tally	Weight
Mental Demand	65	2	0.13	Mental Demand	35	2	0.13
Physical Demand	80	5	0.33	Physical Demand	55	4	0.27
Temporal Demand	55	0	0.00	Temporal Demand	55	1	0.07
Performance	75	3	0.20	Performance	15	3	0.20
Effort	80	4	0.27	Effort	70	5	0.33
Frustration	35	1	0.07	Frustration	25	0	0.00
Overall	74.00			Overall	49.33		
P5 - Hololens				P5 - Projection			
	Rating	Tally	Weight		Rating	Tally	Weight
Mental Demand	70	3	0.20	Mental Demand	55	3	0.20
Physical Demand	30	1	0.07	Physical Demand	50	0	0.00
Temporal Demand	50	3	0.20	Temporal Demand	65	3	0.20
Performance	50	1	0.07	Performance	60	2	0.13
Effort	80	2	0.13	Effort	75	2	0.13
Frustration	60	5	0.33	Frustration	70	5	0.33
Overall	60.00			Overall	65.33		

P6 - Hololens

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	30	2	0.13
Physical Demand	40	1	0.07
Temporal Demand	5	0	0.00
Performance	70	5	0.33
Effort	100	3	0.20
Frustration	55	4	0.27

Overall 64.67

P6 - Projection

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	60	2	0.13
Physical Demand	25	1	0.07
Temporal Demand	5	0	0.00
Performance	45	5	0.33
Effort	100	4	0.27
Frustration	45	3	0.20

Overall 60.33

P7 - Hololens

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	55	3	0.20
Physical Demand	75	5	0.33
Temporal Demand	55	1	0.07
Performance	55	3	0.20
Effort	55	2	0.13
Frustration	70	1	0.07

Overall 62.67

P7 - Projection

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	15	3	0.20
Physical Demand	45	1	0.07
Temporal Demand	15	3	0.20
Performance	5	5	0.33
Effort	20	3	0.20
Frustration	25	0	0.00

Overall 14.67

P8 - Hololens

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	70	2	0.13
Physical Demand	85	3	0.20
Temporal Demand	15	1	0.07
Performance	85	4	0.27
Effort	35	1	0.07
Frustration	60	4	0.27

Overall 68.33

P8 - Projection

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	40	4	0.27
Physical Demand	55	2	0.13
Temporal Demand	55	3	0.20
Performance	45	4	0.27
Effort	35	0	0.00
Frustration	35	2	0.13

Overall 45.67

P9 - Hololens

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	90	3	0.20
Physical Demand	80	1	0.07
Temporal Demand	85	4	0.27
Performance	85	3	0.20
Effort	100	4	0.27
Frustration	90	0	0.00

Overall 89.67

P9 - Projection

	Rating	Tally	Weight
Mental Demand	50	3	0.20
Physical Demand	40	1	0.07
Temporal Demand	40	2	0.13
Performance	30	4	0.27
Effort	75	5	0.33
Frustration	60	0	0.00

Overall 51

Tabela 0-3. Dados fisiológicos calculados.

Piloto	Sistema	Média	BPM	RRi	SDNN	pNN50	LF	HF	LF/HF
1	X	2.97	80.28	747.41	41.14	7.03	1131.80	247.99	4.56
1	R	2.81	78.54	763.91	46.58	15.23	1489.37	576.99	2.58
1	X	3.35	81.57	735.57	35.55	5.21	1220.42	327.14	3.73
1	R	2.54	78.41	765.22	60.54	17.47	4156.19	709.77	5.86
1	H	3.55	82.92	723.60	39.69	7.25	864.60	616.65	1.40
1	R	3.05	81.23	738.66	61.91	16.56	1874.72	1152.87	1.63
1	H	3.87	84.20	712.63	27.88	1.46	288.83	148.33	1.95
1	R	3.12	81.35	737.55	58.14	11.80	2801.12	1235.61	2.27
1	H	3.92	80.46	745.68	24.22	1.32	225.49	161.48	1.40
1	R	2.90	80.72	743.29	52.27	8.87	1941.12	500.51	3.88
1	X	4.07	81.24	738.58	39.52	2.55	908.72	137.88	6.59
2	H	2.62	82.33	728.78	14.60	0.00	107.20	55.21	1.94
2	R	2.97	80.28	747.36	24.43	0.34	519.27	76.41	6.80
2	X	2.64	78.56	763.79	15.24	0.42	182.45	59.68	3.06
2	R	2.68	79.67	753.14	28.01	0.51	289.06	43.70	6.61
2	X	2.77	80.41	746.16	16.86	0.00	147.15	45.71	3.22
2	R	3.15	78.26	766.72	27.56	0.91	427.69	127.76	3.35
2	X	2.69	80.44	745.90	16.19	0.00	169.36	42.31	4.00
2	R	2.83	77.80	771.20	29.18	2.19	758.82	279.35	2.72
2	H	3.09	81.05	740.31	20.87	0.41	167.92	51.05	3.29
2	R	3.63	80.65	743.99	26.25	1.53	369.26	149.40	2.47
2	H	3.16	79.44	755.29	13.76	0.00	79.52	49.19	1.62
3	H	8.87	71.94	834.05	29.73	6.48	499.80	240.29	2.08
3	R	9.70	75.87	790.80	56.21	17.42	2453.75	310.84	7.89
3	H	9.47	75.26	797.24	37.69	6.60	443.72	175.64	2.53
3	R	10.18	71.89	834.62	47.01	22.68	1243.48	320.63	3.88
3	X	9.75	73.37	817.75	26.54	2.73	398.83	151.14	2.64
3	R	10.17	76.05	789.01	67.58	14.95	4179.96	557.19	7.50
3	X	9.61	71.80	835.61	39.23	9.39	871.91	223.64	3.90
4	H	0.41	83.59	717.82	39.27	1.90	1237.28	153.42	8.06
4	R	0.40	78.89	760.55	44.17	4.72	1680.00	192.01	8.75
4	H	0.41	81.81	733.44	33.54	1.50	904.37	74.89	12.08
4	R	0.41	91.54	655.48	80.38	16.05	2027.57	595.50	3.40
4	X	0.45	79.35	756.11	34.18	4.05	764.53	182.81	4.18
4	R	0.45	75.96	789.86	39.85	2.64	1321.12	172.85	7.64
4	H	0.54	79.66	753.18	33.50	1.24	809.61	141.41	5.73
4	R	0.55	78.98	759.72	61.44	7.81	3844.71	433.15	8.88
4	X	0.61	80.43	745.96	29.00	0.00	605.53	99.80	6.07
4	R	0.61	82.79	724.76	49.64	6.56	1777.05	296.78	5.99
4	X	0.69	86.12	696.69	28.97	2.23	378.70	53.27	7.11
5	H	8.11	87.36	686.79	13.24	0.00	131.43	13.31	9.87
5	R	8.72	79.67	753.12	24.54	0.00	432.21	140.89	3.07
5	H	9.02	84.20	712.58	13.92	0.00	55.74	7.92	7.04
5	R	8.94	82.05	731.27	37.46	1.03	1301.58	121.19	10.74
5	X	9.37	83.43	719.21	18.21	0.00	401.59	32.09	12.52
5	R	7.52	82.29	729.09	26.00	0.00	665.31	47.23	14.09
5	X	8.54	88.98	674.33	11.81	0.00	57.79	9.15	6.31
5	R	8.10	82.12	730.62	28.17	0.00	625.14	51.95	12.03
5	H	9.25	85.73	699.85	24.01	0.00	274.95	15.50	17.74
5	R	9.82	83.24	720.80	34.86	0.88	1342.28	49.80	26.95
5	X	10.33	86.98	689.80	17.35	0.00	97.34	8.33	11.68

6	H	4.26	82.03	731.48	26.54	0.86	417.59	56.58	7.38
6	R	4.09	86.70	692.06	37.86	0.39	729.12	136.48	5.34
6	H	4.51	81.08	740.04	17.34	0.45	85.84	51.48	1.67
6	R	4.28	83.35	719.82	36.92	1.88	1088.55	54.53	19.96
6	H	4.77	81.54	735.85	16.88	0.00	256.99	78.48	3.27
6	R	4.28	84.02	714.10	25.06	0.34	585.49	134.02	4.37
6	X	4.36	82.57	726.64	23.37	0.00	620.75	68.47	9.07
6	R	3.65	87.99	681.93	29.78	0.66	1118.90	130.12	8.60
6	X	3.64	83.38	719.56	16.75	0.00	76.63	49.63	1.54
6	R	3.47	83.39	719.53	33.69	2.27	1785.53	88.43	20.19
6	X	3.73	80.50	745.33	28.86	1.20	443.61	83.06	5.34
7	H	5.70	87.52	685.58	25.00	0.00	388.61	95.62	4.06
7	R	6.15	88.60	677.21	28.08	0.57	638.63	154.01	4.15
7	X	5.53	86.92	690.32	23.37	0.00	364.64	53.27	6.85
7	R	6.28	90.15	665.59	42.42	3.75	987.29	101.58	9.72
7	X	5.78	86.81	691.16	22.75	0.38	308.57	76.31	4.04
7	R	6.40	86.60	692.86	42.40	3.26	1091.64	187.30	5.83
7	X	6.39	90.24	664.90	18.74	0.00	164.70	38.22	4.31
7	R	7.26	87.48	685.91	36.79	1.95	955.49	193.74	4.93
7	H	6.15	89.39	671.25	16.79	0.00	271.15	54.08	5.01
7	R	6.69	87.20	688.04	30.76	1.68	558.19	198.24	2.82
7	H	7.26	88.67	676.68	19.41	0.00	261.62	84.79	3.09
8	H	7.02	86.74	691.74	35.97	2.11	1017.97	136.80	7.44
8	R	7.69	84.33	711.53	38.16	3.51	1501.42	385.79	3.89
8	H	6.47	85.85	698.86	23.77	0.73	458.79	95.30	4.81
8	R	8.21	89.26	672.16	37.51	4.80	870.09	358.85	2.42
8	H	7.60	86.84	690.95	28.02	1.79	629.14	194.76	3.23
8	R	9.54	88.61	677.14	36.27	2.12	795.79	96.82	8.22
8	X	7.94	87.90	682.56	23.29	1.57	466.76	65.86	7.09
8	R	10.15	88.52	677.83	36.73	3.61	1173.08	560.16	2.09
8	X	7.52	90.29	664.51	17.50	0.37	258.55	73.32	3.53
8	R	9.36	84.88	706.87	30.77	2.35	1085.53	432.09	2.51
8	X	8.15	88.92	674.79	23.32	0.78	153.29	33.08	4.63
9	H	24.41	81.04	740.33	26.58	5.49	157.98	337.09	0.47
9	R	17.32	82.04	731.36	20.79	0.36	387.91	47.12	8.23
9	H	28.00	83.25	720.75	11.03	0.00	77.56	12.86	6.03
9	R	18.63	77.97	769.49	20.61	0.00	325.63	45.74	7.12
9	X	26.30	82.78	724.79	9.45	0.00	56.76	9.63	5.89
9	R	20.85	78.73	762.12	17.01	0.00	186.60	25.38	7.35
9	X	25.07	81.80	733.49	9.62	0.00	51.24	7.23	7.09
9	R	15.49	79.78	752.05	16.30	0.00	120.67	29.85	4.04
9	H	20.40	77.20	777.20	10.85	0.00	95.14	15.60	6.10
9	R	17.16	80.33	746.95	14.58	0.00	149.37	38.45	3.88
9	X	23.67	80.55	744.92	10.20	0.00	68.75	10.16	6.76