

CLOER VESCIA ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA QUANTIFICAÇÃO DA
DESORIENTAÇÃO ESPACIAL**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, na área de conhecimento de Tecnologia da Informação/Engenharia Biomédica da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Dra. Thais Russomano, Ph.D.

**Porto Alegre
2008**

De forma lúdica, faz-se necessário registrar um pequeno relato a respeito da ligação do autor deste trabalho com a medicina e com a aviação.

“Ali, postado junto ao parapeito do andar superior do aeroporto Santos-Dumont, no Rio de Janeiro, em 1966, aos domingos, o então menino de três anos de idade, apreciava a movimentação dos aviões, encontrando sintonia com algo que somente o tempo poderia revelar o pleno significado – o destino.

Os relatos feitos pelos pais dão conta de que os suspiros daquele pequeno espectador somente eram interrompidos pelas referências que fazia quanto ao *doutor de avião*, que, naquele imaginário infantil, parecia existir na figura dos profissionais que se aproximavam das aeronaves, entravam e saíam, durante a etapa de preparo para o vôo, desde a chegada até a partida, num frenético vai-e-vem de pessoas.

Repetidamente, dizia que seria *doutor de avião*, quando crescesse.

Os anos seguintes foram marcados pelas incontáveis *cirurgias* realizadas nas bonecas, que insistiam em desaparecer da vista da irmã (mais nova), até serem descobertas no *hospital* que mantinha dentro de diversas caixas de sapato, secretamente guardadas embaixo de um armário. Vez por outra, os sobrevôos das aeronaves da Força Aérea Brasileira sobre a cidade do interior onde residia reforçavam-lhe os anseios e consolidavam o compromisso com o sonho.

Com a adolescência vieram as intermináveis leituras sobre medicina e aviação e as visitas ao aeroclube.

Então, como um raio, surgiu a necessidade de optar entre *ser piloto* e *ser médico*. Decisão difícil, muito difícil, difícilíssima, pois não há como se separar ao meio um sonho. Assim, nascia o doutor de avião, pois, ao optar pela faculdade de medicina, assumiu consigo mesmo, um segundo desafio: voaria tão logo estivesse formado. A faculdade, a residência, o concurso para a Força Aérea...

Tudo foi muito rápido!

Somente o sonho foi percebido, como verdade e destino, quando, na primeira decolagem a bordo de uma aeronave da Força Aérea Brasileira, o então Tenente Médico Cloer, Médico de Esquadrão, alçou vôo para viver plenamente, a partir daí, como *doutor de avião*.

Com os olhos cheios de lágrimas, na cabeceira da pista, e com a sensação de que o coração batia mais rápido do que o giro dos motores, o homem encontrava o seu destino, voando, nas asas da medicina.

No mais, histórias...”

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela possibilidade de ter sido uma criança feliz, capaz de sonhar e encontrar o próprio destino, a partir das oportunidades de estudo que me foram dadas.

Aos colegas de mestrado que compartilharam comigo as angústias e alegrias de todos os momentos, principalmente os difíceis, durante o período de preparação para a dissertação.

Aos prestimosos Rodrigo Cambraia, Denver e Gustavo Dalmarco que sempre estiveram dispostos a auxiliar de diferentes formas para que este trabalho obtivesse êxito.

Aos queridos colegas de Força Aérea, os amigos Jorge Kersul Filho, Mário Luis da Silva Jordão e Luis Alberto Pereira Bianchi, pela fidalguia e apoio nas diversas etapas deste trabalho.

Ao companheiro de jornada, Engenheiro Felipe Prehn Falcão, pela dedicação e persistência em permanecer comigo durante todos os momentos decisivos no desenvolvimento deste trabalho.

A minha orientadora e amiga, Dra. Thais Russomano, que me proporcionou o contato com o então Laboratório de Microgravidade da PUCRS, bem como incentivou o meu crescimento em direção à área acadêmica.

À minha família, por ter suportado a *ausência ainda que presente* do marido e do pai, sempre me incentivando, de forma incondicional, mesmo que o tempo não promettesse retribuir a perda da convivência... Daniela, Fernanda e Raquel!

RESUMO

Esta dissertação descreve o desenvolvimento da Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada - Aperfeiçoada (CREC-Ap), a partir do modelo modificado por Gessinger (2005), cuja base foi a dissertação de mestrado de Piedade (2001), sendo ambos os trabalhos desenvolvidos no então Laboratório de Microgravidade, do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas (IPCT), da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Foram incorporados diversos itens: estrutura de alumínio, estrutura de aço, cobertura, freio hidráulico, manche, aplicativo para captação de sinais e quantificação da desorientação, microcâmera, HUB USB sem fio, monitor de vídeo, expensor de portas USB, *software* de simulador de vôo, conector rotativo e régua de distribuição de energia elétrica. A base teórica traz a revisão bibliográfica a respeito da fisiologia relacionada à desorientação espacial, bem com aspectos detalhados da gênese deste fenômeno e suas implicações na atividade aérea, com o foco na segurança de vôo, a partir da prevenção. A seguir, são apresentados os materiais e métodos utilizados, trazendo na seqüência os resultados e discussões a respeito dos aperfeiçoamentos propostos, concluindo-se que a CREC-Ap proporcionará ampla aplicação, tanto na aérea de educação quanto de pesquisa, em prol da segurança de vôo.

Palavras-chave: Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap). Fisiologia do equilíbrio e da orientação. Desorientação espacial. Prevenção. Segurança de vôo.

ABSTRACT

This dissertation describes the development of the Improved-Electrically Controlled Rotatory Chair (I-ECRC), from the model previously modified by Gessinger (2005), who in turn based developments on the Masters dissertation of Piedade (2001), both having been developmental works carried out in Microgravity Laboratory, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUCRS). Several new items were incorporated: aluminum structure, steel structure, a cover, hydraulic brake, joystick, an application to capture and quantify signs of disorientation, micro-camera, wireless USB HUB, video monitor, USB ports expander, flight simulator software, rotating connector and device for distribution of electric energy. The theory basis brings the bibliographic review of the physiology related to spatial disorientation, as well detailing aspects of this phenomenon and implications in aerial activity, with the focus in the flight safety, from the prevention. In the sequence, materials and methods are presented, followed by the results and discussions of the proposed improvements, concluding that I-ECRC will bring large application to education and research in order to improve the flight safety.

Key words: Improved-Electrically Controlled Rotary Chair (I-ECRC). Physiology of the equilibrium and orientation. Spatial Disorientation. Prevention. Flight Safety.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Fórmula para obtenção da rotação final da CREC-Ap	110
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vôo do 14 bis.....	2
Figura 2 - Airbus A380.....	3
Figura 3 - Caça supersônico Sukhoi 30.....	4
Figura 4 - Helicóptero Agusta.....	4
Figura 5 - Missão de evacuação aeromédica.....	6
Figura 6 - Missão de rapel.....	7
Figura 7 - Aeronaves F-5 Tiger II.....	8
Figura 8 - Helicóptero Esquilo AS 350 B2.....	10
Figura 9 - King Air C-90 SE.....	10
Figura 10 - Modelos de crânio humano exemplificando a evolução.....	14
Figura 11 - Aeronave em aproximação para pouso.....	18
Figura 12 - Esquema demonstrativo dos sistemas humanos de orientação espacial e de equilíbrio	19
Figura 13 - Estruturas externas ao globo ocular.....	22
Figura 14 - Vista exrterna do olho humano.....	23
Figura 15 - Posição do globo ocular na cavidade óssea.....	23
Figura 16 - Fixação do globo ocular na cavidade pela musculatura ocular.....	24
Figura 17 - Partes do globo ocular.....	25
Figura 18 - Globo ocular humano e suas diversas estruturas.....	26
Figura 19 - Ilustração da retina.....	30
Figura 20 - Campos visuais, retina, quiasma, trato óptico e radiação óptica.....	32
Figura 21 - Músculos oculares e inervação.....	33

Figura 22 - Esquema demonstrando os mecanismos de fixação dos olhos.....	34
Figura 23 - Imagem “mutável”.....	36
Figura 24 - Jovem moça ou velha senhora.....	37
Figura 25 - Tabuleiros de xadrez.....	38
Figura 26 - Linhas horizontais.....	39
Figura 27 - Linhas vermelhas verticais.....	39
Figura 28 - Círculos girando.....	40
Figura 29 - Anatomia da orelha humana.....	41
Figura 30 - Anatomia da orelha externa.....	42
Figura 31 - Anatomia da orelha média e cadeia de ossículos.....	43
Figura 32 - Anatomia da orelha interna.....	44
Figura 33 - Anatomia da Cóclea.....	45
Figura 34 - Estrutura do Órgão de Corti.....	46
Figura 35 - Escalas.....	46
Figura 36 - Via Auditiva.....	49
Figura 37 - Topografia do Labirinto Posterior – Sistema Vestibular.....	51
Figura 38 - Labirinto Posterior – Sistema Vestibular.....	52
Figura 39 - Anatomia do aparelho vestibular com seus diversos componentes funcionais.....	53
Figura 40 - Célula ciliar vista em detalhe.....	55
Figura 41 - Correlação dos canais semicirculares com os eixos de movimento de rotação numa aeronave (asa fixa) e respectivos comandos.....	56
Figura 42 - Correlação dos movimentos realizados com a cabeça e atuação dos canais semicirculares.....	57

Figura 43 - Cerebelo e conexões integradas com a formação reticular.....	59
Figura 44 - Integração das informações relativas aos movimentos.....	60
Figura 45 - Demonstração dos diversos receptores do sistema proprioceptivo.....	62
Figura 46 - Aeroplano Demoisele.....	67
Figura 47 - Caça Supersônico Sukhoi 30.....	68
Figura 48 - Ilusão Visual “Forma Constante”.....	72
Figura 49 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho”.....	73
Figura 50 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho” (aproximação baixa).....	74
Figura 51 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho” (aproximação alta).....	74
Figura 52 - Ilustração de Ilusão Visual (referência em relação ao solo).....	75
Figura 53 - Aproximação sobre vegetação.....	76
Figura 54 - Aeronave Hércules C-130 da FAB pousada na Antártida.....	77
Figura 55 - Nevasca.....	78
Figura 56 - Ilusão do tipo buraco negro.....	79
Figura 57 - Ilusão do tipo buraco negro (luzes da cidade).....	80
Figura 58 - Vôo em formação.....	81
Figura 59 - Esquadrilha da Fumaça.....	81
Figura 60 - Falso horizonte.....	83
Figura 61 - Ilusão vestibular do tipo Somatogiratória.....	85
Figura 62 - Espiral mortal.....	86
Figura 63 - Parafuso mortal.....	87
Figura 64 - Ilusão de Coriolis.....	88
Figura 65 - Desnivelamento.....	89
Figura 66 - Ilusão somatogravitacional.....	90

Figura 67 - Aceleração linear.....	91
Figura 68 - Ilusão de inversão.....	92
Figura 69 - Mão gigante.....	93
Figura 70 - Antigo simulador de vôo.....	96
Figura 71 - Simulador de vôo demonstrando a cabine.....	96
Figura 72 - Moderno simulador de vôo.....	97
Figura 73 - Cabine de vôo de um moderno simulador da NASA.....	98
Figura 74 - Cabine intercambiável de vôo de um moderno simulador da NASA.....	99
Figura 75 - Demonstrador de desorientação – <i>Desdemona</i>	101
Figura 76 - Robert Bárány.....	102
Figura 77 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC).....	106
Figura 78 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC) modificada.....	107
Figura 79 - CREC (Piedade).....	109
Figura 80 - Tacômetro digital.....	111
Figura 81 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (Gessinger).....	112
Figura 82 - Base da CREC (vista interna).....	113
Figura 83 - Base da CREC (vista externa).....	113
Figura 84 - Revestimento de espuma no interior da base da cadeira.....	114
Figura 85 - Trava dentada de aço 1020.....	114
Figura 86 - Sistema de trava.....	115
Figura 87 - Angulação do encosto a 90°.....	115
Figura 88 - Angulação do encosto a 0°.....	115
Figura 89 - Apoio para membros inferiores.....	116
Figura 90 - Cinto de segurança de cinco pontos.....	117

Figura 91 - Estrutura detalhada da CREC separada por componentes.....	119
Figura 92 - Verificação das dimensões da nacele.....	121
Figura 93 - Estrutura de tubos de alumínio.....	122
Figura 94 - Estrutura de tubos de aço.....	124
Figura 95 - Estrutura da parte frontal inferior (pernas).....	125
Figura 96 - Estrutura da parte frontal inferior (pés).....	126
Figura 97 - Vista frontal da cobertura.....	127
Figura 98 - Sistema de freio de motocicleta adaptado à CREC-Ap.....	128
Figura 99 - Detalhes do conjunto de acionamento do freio.....	129
Figura 100 - Instalação do conjunto de freio.....	130
Figura 101 - Peças metálicas de fixação em formato de “L” e em “T”.....	131
Figura 102 - Detalhe de fixação do disco de freio ao eixo da CREC-Ap.....	132
Figura 103 - <i>Mock-up</i> do <i>cockpit</i> da aeronave F-5 M da FAB.....	133
Figura 104 - Detalhe do manche da aeronave F-5 M.....	133
Figura 105 - Detalhes do manche e instalação.....	134
Figura 106 - Imagem com <i>print screen</i> da tela.....	136
Figura 107 - Imagem com <i>print screen</i> da tela principal.....	137
Figura 108 - Imagem com <i>print screen</i> da tela (configurações).....	139
Figura 109 - Microcâmera Infravermelho.....	140
Figura 110 - Unidade transmissora VHF.....	141
Figura 111 - USB sem fio (WUSB).....	142
Figura 112 - Demonstração das taxas de transmissão do sistema WUSB.....	143
Figura 113 - Vista frontal do monitor LCD de 19 polegadas.....	145
Figura 114 - Vista de perfil do monitor LCD 19 polegadas.....	146

Figura 115 - Vista da parte posterior do monitor.....	147
Figura 116 - Estrutura tubular de fixação do monitor.....	148
Figura 117 - Monitor LCD e <i>joystick</i> fixados na CREC-Ap.....	149
Figura 118 - Dispositivo de expansão de portas com interface USB.....	150
Figura 119 - Periféricos acoplados ao expansor de portas.....	150
Figura 120 - Conector rotativo de 4A.....	152
Figura 121 - Vista dos componentes separados.....	152
Figura 122 - Vista dos três componentes encaixados.....	153
Figura 123 - Instalação do conector rotativo.....	154
Figura 124 - Fixação da régua de distribuição de energia elétrica.....	155
Figura 125 - Perfil para teste da indução do Efeito de Coriolis.....	157
Figura 126 - Estrutura da parte frontal inferior.....	161
Figura 127 - Vista superior da estrutura da parte frontal inferior.....	163
Figura 128 - Frente da CREC-Ap.....	164
Figura 129 - Lateral Esquerda.....	164
Figura 130 - Abertura lateral Esq.....	164
Figura 131 - Interior da CREC-Ap.....	164
Figura 132 - Vista da instalação do conjunto de freio.....	166
Figura 133 - Teste com a CREC-Ap.....	168
Figura 134 - Microcâmara Infravermelho fixada no monitor.....	169
Figura 135 - Monitor de vídeo de 14 polegadas.....	170
Figura 136 - Unidade Transceptora USB sem fio (WUSB).....	171
Figura 137 - Transceptor USB.....	172
Figura 138 - Imagem do <i>Flight Capture</i> no monitor LCD.....	172

Figura 139 - Imagem do <i>Flight Simulator X</i> no monitor LCD durante “vôo”	173
Figura 140 - Monitor LCD e <i>joystick</i>	173
Figura 141 - Dispositivo de expansão de portas com interface USB.....	174
Figura 142 - Régua de distribuição de energia elétrica com periféricos.....	176
Figura 143 - Unidade de controle da CREC-Ap.....	177
Figura 144 - Parte da unidade de controle.....	178
Figura 145 - CREC-Ap sem a cobertura e Unidade de Controle.....	178
Figura 146 - Esquema demonstrando o perfil executado para teste da CREC-Ap na indução do Efeito de Coriolis.....	179
Figura 147 - Esquema demonstrando a utilização da CREC-Ap para quantificação da desorientação espacial pela estimulação dos canais semicirculares.....	180
Figura 148 - Checagem da captura de imagens pela microcâmara.....	181
Figura 149 - Calibragem dos movimentos do manche da CREC-Ap.....	182
Figura 150 - “Vôo” de teste na CREC-Ap.....	183
Figura 151 - Imagem do <i>Flight Simulator X</i> no monitor.....	184
Figura 152 - Quadro comparativo da CREC-Ap.....	186
Figura 153 - Autor deste trabalho durante “vôo” de teste na CREC-Ap.....	189

LISTA DE SIGLAS

BACG – Base Aérea de Campo Grande

BACO – Base Aérea de Canoas

CD-ROM – Disco Compacto - Memória Apenas por Leitura (Sigla para *Compact Disc-Read Only Memory*)

CENIPA – Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

COMAER – Comando da Aeronáutica

CPU – Unidade de Controle de Força (Sigla para *Control Power Unit*)

CREC – Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada

CREC-Ap – Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada

EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica

EDA – Esquadrão de Demonstração Aérea

FAB – Força Aérea Brasileira

GAv – Grupo de Aviação

HUD – Dispositivo de leitura com a cabeça elevada(Sigla para *Head-up Display*)

IPCT – Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas

MS – Mato Grosso do Sul

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

RAM – Memória de Acesso Randômico (Sigla para *Randon Access Memory*)

ROM – Sigla para Memória Apenas por Leitura (*Read Only Memory*)

RS – Rio Grande do Sul

SAR – Busca e Salvamento (Sigla para *Search and Rescue*)

SNC – Sistema Nervoso Central

UTI – Unidade de Terapia Intensiva

VHF – Very High Frequency (Sigla para *Very High Frequency*)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE EQUAÇÕES.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE SIGLAS.....	XVI
SUMÁRIO.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação.....	5
1.3 Identificação do Problema.....	11
1.4 Hipótese.....	11
1.5 Objetivos.....	12
1.6 Estrutura da Dissertação de Mestrado.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Sistemas Humanos de Orientação Espacial e de Equilíbrio.....	18
2.1.1 Sistema Visual.....	20
2.1.1.1 Anatomia e Fisiologia do Sistema Visual.....	21
2.1.1.2 Via Ótica.....	29
2.1.1.3 Controle Ocular.....	33
2.1.1.3.1 Controle Muscular dos Movimentos Oculares.....	33
2.1.1.3.2 Vias Neurais para Controle dos Movimentos Oculares.....	35
2.1.1.3.3 Controle Vestibular dos Movimentos Oculares.....	35

2.1.1.4	Percepção Visual.....	36
2.1.1.5	Ilusões de Ótica.....	38
2.1.2	Sensibilidade ao Som e ao Movimento – Órgão Vestíbulo-Coclear.....	41
2.1.2.1	Orelha.....	41
2.1.2.1.1	Orelha Externa.....	42
2.1.2.1.2	Orelha Média.....	43
2.1.2.1.3	Orelha Interna.....	44
2.1.2.1.3.1	Labirinto Anterior – Cóclea.....	45
	<u>Via auditiva</u>	48
2.1.2.1.3.2	Labirinto Posterior – Sistema Vestibular.....	50
	<u>Anatomia e Fisiologia do Sistema Vestibular</u>	52
	<u>Conexões Nervosas do Sistema Vestibular com o SNC</u>	57
2.1.3	Sistema Proprioceptivo.....	61
2.1.3.1	Proprioceptores.....	63
2.1.3.1.1	Músculos e Tendões.....	63
2.1.3.1.2	Articulações.....	65
2.1.3.2	Exteroceptores.....	66
2.2	Desorientação Espacial.....	67
	<u>Impossibilidade de Adaptação Fisiológica</u>	68
2.2.1	Desorientação Espacial Tipo I.....	69
2.2.2	Desorientação Espacial Tipo II.....	70
2.2.3	Desorientação Espacial Tipo III.....	70

2.2.4 Ilusões em Vôo.....	71
2.2.4.1 Ilusões Visuais.....	71
2.2.4.1.1 Forma Constante.....	71
2.2.4.1.2 Tamanho Constante.....	73
2.2.4.1.3 Falta de Referenciais no Ambiente.....	76
2.2.4.1.4 Buraco Negro.....	78
<u>Vôo em formação e o maior risco de ilusão.....</u>	80
2.2.4.1.5 Autocinese.....	82
2.2.4.1.6 Falso Horizonte.....	82
2.2.4.2 Ilusões Vestibulares.....	84
2.2.4.2.1 Ilusões Somatogiratórias.....	84
<u>Espiral Mortal.....</u>	84
<u>Ilusão de Coriolis.....</u>	87
<u>Desnivelamento.....</u>	89
2.2.4.2.2 Ilusões Somatogravitacionais.....	90
<u>Ilusão de Inversão.....</u>	92
<u>Fenômeno da Mão Gigante.....</u>	93
2.2.5 Prevenção da Desorientação Espacial.....	95
2.2.5.1 Simuladores de Vôo.....	95
2.2.5.2 Cadeira de Bárány.....	102
2.2.5.2.1 Aplicações da Cadeira Rotatória.....	103
<u>Demonstração da Ilusão Somatogiratória.....</u>	103
<u>Demonstração do Efeito de Coriolis.....</u>	104

2.2.5.2.2 Fundamentos Fisiológicos para realização do treinamento em cadeira rotatória.....	104
2.2.5.2.3 Aperfeiçoamento da Cadeira de Bárány.....	105
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	108
3.1 Etapa I – Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC).....	108
3.1.1 Fase I – CREC desenvolvida por Piedade, em 2001.....	108
3.1.2 Fase II – CREC modificada por Gessinger, em 2005.....	111
3.1.3 Fase III – Desenvolvimento da CREC-Aperfeiçoada.....	117
3.1.3.1 Estrutura em Alumínio.....	120
3.1.3.2 Estrutura em Aço.....	123
3.1.3.3 Estrutura para apoio das pernas.....	125
3.1.3.4 Estrutura para Apoio dos Pés.....	125
3.1.3.5 Cobertura.....	126
3.1.3.6 Sistema de Freio Hidráulico.....	127
3.1.3.7 Manche do Comando de Vôo.....	132
3.1.3.8 Aplicativo para Quantificação da Desorientação Espacial.....	135
3.1.3.8.1 Descrição de cada área da Tela Principal.....	137
3.1.3.8.2 Quantificação da Desorientação Espacial.....	139
3.1.3.9 Microcâmera.....	140
3.1.3.10 Sistema HUB USB sem fio (<i>WUSB</i>).....	141
3.1.3.11 Monitor de Vídeo LCD de 19 polegadas.....	144
3.1.3.12 Dispositivo de Expansão de Portas com Interface USB.....	149
3.1.3.13 Software de Simulador de Vôo (Flight Simulator X).....	151
3.1.3.14 Conector rotativo para alimentação elétrica.....	151

3.1.3.15 Régua para distribuição de energia elétrica.....	155
3.2 Etapa II - Integração dos Dispositivos e Sistemas da CREC-Ap com a unidade de controle.....	156
3.3 Etapa III - Testes com a Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap).....	157
<u>Etapas do teste realizado pelo autor deste trabalho</u>	
<u>para indução do Efeito Coriolis.....</u>	158
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	160
4.1 Etapa I – Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap).....	160
4.1.1 Estrutura em alumínio.....	160
4.1.2 Estrutura em aço.....	162
4.1.3 Estrutura para apoio das pernas.....	162
4.1.4 Estrutura para apoio dos pés.....	163
4.1.5 Cobertura.....	164
4.1.6 Sistema de freio hidráulico.....	165
4.1.7 Manche do comando de vôo.....	167
4.1.8 Aplicativo para quantificação da desorientação espacial.....	167
4.1.9 Microcâmera.....	169
4.1.10 Sistema HUB USB sem fio (WUSB).....	170
4.1.11 Monitor de vídeo LCD de 19 polegadas.....	172
4.1.12 Dispositivo com expansão de portas com interface USB.....	174
4.1.13 Software de Simulador de Vôo (Flight Simulator).....	175
4.1.14 Conector rotativo para alimentação elétrica.....	175

4.1.15 Régua para distribuição de energia elétrica.....	175
4.2 Etapa II - Integração dos dispositivos e sistemas da CREC-Ap com a Unidade de Controle.....	176
4.3 Etapa III - Testes com a CREC-Ap.....	179
5 CONCLUSÕES.....	185
<u>Perspectivas.....</u>	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	190
APÊNDICE 1 – Artigo Científico (submetido e aceito para publicação).....	195

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O homem – ser adaptado à vida terrestre – possui sentidos eficientes e capazes de mantê-lo em equilíbrio e orientado no espaço, perfeitamente ajustados à condição gravitacional da Terra e, à custa disso, pode experimentar diversos tipos de movimentos mantendo o senso de orientação, considerando-se a existência de uma aceleração constante, a força da gravidade, de $9,82 \text{ m/s}^2$ (BENSON, 1998).

Apesar da capacidade de adaptação da fisiologia humana, quando no seu ambiente natural terrestre, em relação à orientação em vôo, no entanto, isso não ocorre, pois este ambiente não proporciona estímulos adequados para os sentidos adaptados à vida na terra. Nesta situação, os referenciais para o equilíbrio e orientação são diferentes, surgindo um conflito de informações provenientes desses mesmos sentidos que podem provocar a perda da capacidade de orientar-se no espaço, ou seja, a desorientação espacial (BENSON, 1998).

A partir da criatividade humana, aliada à engenhosidade, em pouco mais de cinquenta anos, desde o primeiro vôo com o mais-pesado-do-que-o-ar (Figura 1), surgiram inventos que levaram o homem, rapidamente, além do ambiente aéreo, alcançando o espaço, o que o colocou em contato com outras forças acelerativas diferentes da ação da gravidade – as acelerações lineares e angulares.

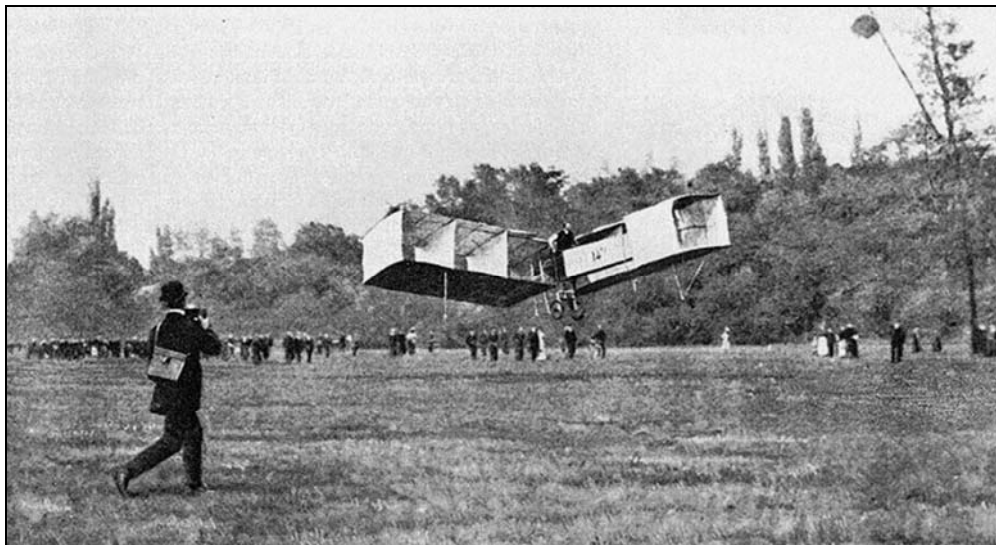


Figura 1 - Vôo do 14 bis: Alberto Santos-Dumont, no dia 23 de outubro de 1906, em Paris, França, voando diante de uma multidão.
Fonte: <http://www.14bis.mil.br>

Desta forma, ao se abordar a desorientação espacial, faz-se necessário compreender o trinômio – o homem, a máquina e o meio – pois suas variáveis estão estreitamente ligadas ao resultado da interação desses três elementos.

Em condições normais, a orientação espacial no vôo – a atitude da aeronave em relação à superfície terrestre – se dá em função do sentido da visão do piloto que o mantém orientado, tendo como referência a linha do horizonte, o que pode ser confirmado pelos instrumentos da aeronave. No entanto, quando as referências visuais se tornam prejudicadas, como em vôos com baixa visibilidade, passa a existir predomínio das informações provenientes do sistema proprioceptivo e do sistema vestibular, susceptíveis às acelerações (lineares e angulares). Nessa condição, quando o horizonte terrestre não está visível, a exemplo do que ocorre no vôo por instrumentos, a orientação do piloto se mantém a partir das informações provenientes do painel de instrumentos da aeronave (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Tal situação pode fazer com que haja desacordo entre a informação visual obtida na leitura dos instrumentos e as informações oriundas do sistema vestibular e do sistema proprioceptivo, que induzem à interpretação equivocada pelo cérebro humano a respeito do que está acontecendo, o que vem a provocar uma situação na qual o homem não consegue se orientar, ou seja, perde a noção de localização no espaço – a desorientação espacial (GILLINGHAM;

PREVIC, 1996). Essa condição vem determinando incontáveis perdas humanas e materiais desde os primórdios da aviação.

Em relação ao homem, não há qualquer tipo de adaptação fisiológica possível à desorientação espacial, ainda que se possa avançar no conhecimento profundo da fisiologia humana. No entanto, estudos apontam que há menor susceptibilidade à desorientação espacial quanto maior a vivência do indivíduo, o que estimula o treinamento dos pilotos (READ, 1988). Quanto à máquina, continuam os incontáveis avanços tecnológicos e incorporação de sistemas cada vez mais complexos que equipam as aeronaves atualmente. O meio aeroespacial permanece com suas características inalteradas.

Do vôo do monomotor (14 bis) – que voou com a cauda para frente e com o piloto em pé acionando comandos a partir de cabos e polias – a aviação evoluiu para enormes aeronaves de passageiros (Figura 2), com sistemas computadorizados, caças supersônicos (Figura 3) dotados de alta manobrabilidade, além de máquinas capazes de voar se movimentando em três eixos simultaneamente – os helicópteros (Figura 4).



Figura 2 - Airbus A380 em aproximação final para pouso.
Fonte: <http://www.airbus.com/a380>



Figura 3 - Caça supersônico Sukhoi 30
Fonte: <http://www.sukhoi.org>



Figura 4 - Helicóptero Agusta, em versão aeromédica, efetuando pouso na neve.
Fonte: <http://www.rega.ch>

Apesar dos avanços tecnológicos, a ocorrência de desorientação espacial persiste provocando acidentes com perdas humanas e materiais, o que reforça o papel da prevenção, a partir do treinamento.

Um dos instrumentos mais utilizados no mundo para treinar pilotos e astronautas para prevenir a ocorrência de desorientação espacial é a Cadeira de Bárány, criada pelo médico fisiologista Robert Bárány, que provoca aceleração angular

idêntica à que ocorre em vôo. Diversos sistemas, como os simuladores de vôo, podem reproduzir as acelerações encontradas em vôo, porém, com elevado custo de aquisição, de manutenção e de utilização (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Desta forma, este trabalho propõe um sistema baseado na Cadeira de Bárány para quantificar a desorientação espacial a partir do aperfeiçoamento de uma Cadeira Eletricamente Controlada (CREC), desenvolvida por Piedade (2001), em sua Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), que foi modificada por Gessinger (2005), também em sua Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica na PUCRS.

Tanto na formação de pilotos quanto em sua manutenção operacional, o treinamento em relação à prevenção da desorientação espacial é uma constante. Assim, aspectos como simplicidade, custo e eficácia necessitam compor o escopo de qualquer iniciativa que possa ser pensada para aplicação em larga escala.

Portanto, esta dissertação, ao propor um sistema de quantificação da desorientação espacial, a partir do aperfeiçoamento da CREC, alia simplicidade e baixo custo, o que proporcionará elevado ganho pela ampla possibilidade de utilização no âmbito da aviação, na área acadêmica e de pesquisa.

1.2 Motivação

A experiência profissional ao longo de mais de dez anos como Médico de Esquadrão em unidades operacionais da Força Aérea Brasileira proporcionou ao autor deste trabalho um diferenciado substrato técnico a respeito da desorientação espacial, a partir da convivência estreita com pilotos e atividade aérea exercida em diversos tipos de aeronaves, o que despertou o interesse científico pelo tema.

Em 1989, o contato com a aviação de transporte de tropa no 1^o/15^o Grupo de Aviação, o Esquadrão “Onça” (“15”), sediado na Base Aérea de Campo Grande (BACG), dotado de aeronaves fabricadas pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), Bandeirante C-95 B, bimotor, turboélice, não-pressurizado (Figura 5).

A atividade aérea nos diversos tipos de missão nessas aeronaves (navegação à baixa altura, diurna e noturna, lançamento de carga, lançamento de pára-quadistas, evacuação aeromédica, vôo de formatura, diurno e noturno, dentre outras), ao longo de centenas de horas voadas, agregou significativo conhecimento prático a cerca de diversas situações relacionadas à gênese da desorientação espacial.



Figura 5 - Missão de evacuação aeromédica: autor, em 1989, na aeronave Bandeirante C-95 B do 1º/15º Grupo de Aviação da FAB.

Fonte: O autor (1989).

Em continuidade à atividade profissional, em 1992, como Médico de Esquadrão em unidade SAR (*Search and Rescue*), no 2º/10º Grupo de Aviação, o Esquadrão “Pelicano”, também sediado na BACG, Mato Grosso do Sul, veio a oportunidade de voar em aeronave de asas rotativas, o helicóptero BELL 205 UH-1H, além do Bandeirante na versão SAR, o SC-95 B. O vôo de helicóptero agregou experiência diferenciada em termos de situações relacionadas à desorientação espacial, em função

das características desta aeronave, capaz de movimentar-se simultaneamente nos três eixos. A atividade SAR permitiu realizar todo o tipo de missão de busca e salvamento, nas diversas modalidades (busca de contorno em montanhas, busca no mar e na selva, resgate no mar, guincho, rapel, transporte aeromédico, dentre outras) (Figura 6). Os fatores causadores da desorientação espacial foram evidenciados em diversos momentos dessa atividade aérea, principalmente nas missões noturnas e sobre o mar, em condições de visibilidade restrita. Tais circunstâncias norteiam a atividade de um Médico de Esquadrão da Força Aérea Brasileira e motivaram sobremaneira o estudo e o aprofundamento em relação à desorientação espacial.



Figura 6 - Missão de rapel: autor deste trabalho cumprindo missão de instrução de rapel com o Helicóptero Bell UH-1H, do 2º/10º Grupo de Aviação da FAB, em 1992, na Base Aérea de Campo Grande/MS.

Fonte: O autor (1992).

Em 1995, coroando a experiência profissional na aviação militar, veio a atividade num esquadrão de caça da FAB, o 1º/14º Grupo de Aviação (“14”), o Esquadrão “Pampa”, sediado na Base Aérea de Canoas/RS e que conta com aeronaves NORTHROP F-5 Tiger II (Figura 7) e EMBRAER Tucano T-27 (monomotor turboélice de treinamento). O vôo nessas aeronaves e a convivência com os pilotos de caça, tanto em missões operacionais quanto em treinamento, agregaram conhecimento ímpar em termos de desorientação espacial.



Figura 7 - Aeronaves F-5 Tiger II: camuflagem antiga do 1º/14º GAv, voando em formação durante deslocamento para missão de tiro aéreo, destacando-se, ao fundo, à direita, um F-5 F (aeronave de treinamento com dois assentos, normalmente utilizada por outros tripulantes instrutores de vôo, médico de esquadrão, dentre outros).

Fonte: Acervo do 1º/14º GAv, Base Aérea de Canoas.

Durante os anos de 1995 e 1996, veio novamente o vôo em Bandeirante pelo acúmulo de função como médico de esquadrão do 5º Esquadrão de Transporte Aéreo, o Esquadrão “Pégaso”, também sediado na BACO. Cabe destacar, ainda, a participação do autor deste trabalho na Operação *RED FLAG*, na Base Aérea de Nellis, Nevada, Estados Unidos da América, em 1998, atuando como médico de esquadrão do 1º/16º Grupo de Aviação, o Esquadrão “Adelphi”, da Base Aérea de Santa Cruz/RJ, dotado de aeronaves A1, que representou a FAB nessa operação. A convivência com pilotos de caça de diferentes países agregou experiência.

Atualmente, o “14” conta com aeronaves modernizadas F-5 M, dotadas, dentre outros avanços, do sistema *head-up display* (HUD), o que proporcionou enorme ganho operacional, aliado aos demais avanços tecnológicos incorporados nesse vetor. Ao mesmo tempo em que o sistema HUD evita que o piloto tenha que estar olhando para o painel da aeronave em busca de informações, a operação com tal tecnologia implica em maior atenção por parte do piloto, pois se criou uma nova interface com a aeronave, a partir das informações projetadas no campo visual do piloto. Tal avanço incorporado à frota do “14” chamou a atenção do autor deste trabalho, estimulando-o ainda mais a estudar o tema.

Da mesma forma, alguns acidentes aeronáuticos fatais, especialmente com aeronaves F-5, reafirmaram o interesse científico pelo tema da desorientação espacial; ainda, a atuação como instrutor e elemento credenciado do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) para investigar o Fator Humano (Aspectos Fisiológicos), desde 1996, agregou conhecimento diferenciado quanto ao estudo da participação da desorientação espacial na gênese de diversos acidentes investigados pelo autor deste trabalho.

Cita-se, por fim, como motivação complementar, a atuação como médico de bordo em UTI aérea, onde também foi possível reconhecer a desorientação espacial, principalmente em vôo noturno, sob condições meteorológicas adversas. Esta atividade civil se deu nas aeronaves Esquilo AS 350 B2 (Figura 8) e King Air C-90 SE (Figura 9), ambas da empresa UNIAIR – Transporte Aeromédico Unimed/RS, sediada no Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre/RS.



Figura 8 - Helicóptero Esquilo AS 350 B2.
Fonte: O autor (1999).



Figura 9 - King Air C-90 SE.
Fonte: O autor (2002).

1.3 Identificação do problema

A CREC modificada por Gessinger (2005) foi utilizada tanto em pesquisa quanto em treinamento fisiológico, sendo que algumas limitações foram identificadas, o que consubstanciou a proposta desta dissertação, de forma a aperfeiçoá-la.

Assim, foram elencados os seguintes aspectos que foram trabalhados para o aperfeiçoamento da CREC: interferência do ar, do som e da luminosidade; carência de estrutura para criar um ambiente interno para melhor ambientação do piloto; falta de projeção de imagens do voo a partir de um simulador; carência de um manche semelhante ao de uma aeronave; carência de um aplicativo mais completo para captação de sinais dos movimentos realizados pelo manche; carência de interface com um software de simulação de voo para quantificação da desorientação espacial; instabilidade do apoio para os pés. A partir da identificação desses aspectos, surgiram outros problemas decorrentes da dificuldade de conexão dos diversos componentes que foram sendo introduzidos, além da necessidade de dar suporte e fixar os novos equipamentos, bem como gerar alimentação elétrica e transmissão de sinal aos mesmos, além de prover interligação de forma unificada numa interface.

Da mesma forma, outras dificuldades surgiram à medida que se projetou uma cobertura para a CREC, perdendo-se o contato visual com o piloto no interior da mesma, o que provocou o desafio de captar e gravar imagens do interior da estrutura.

1.4 Hipótese

A hipótese desta dissertação é a de que as soluções propostas para um sistema de quantificação da desorientação espacial promovam uma melhor utilização da cadeira (CREC-Ap), tanto em treinamento quanto em pesquisa.

1.5 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo desenvolver um sistema de quantificação da desorientação espacial, com base na CREC modificada por Gessinger (2005), de forma a aperfeiçoá-la, a partir das seguintes soluções:

- Confeccionar uma estrutura (tubos de alumínio) leve, resistente e de baixo custo de forma a permitir criar um ambiente com formato semelhante ao encontrado na cabine de uma aeronave de caça;
- Confeccionar uma estrutura resistente (estrutura de tubos de aço) para suportar e fixar os diversos componentes incorporados à cadeira, bem como fixar uma melhor estrutura para apoio dos pés e apoiar, complementarmente, a estrutura de alumínio;
- Confeccionar uma estrutura para apoio das pernas;
- Confeccionar uma estrutura mais adequada para apoio dos pés;
- Confeccionar uma cobertura em tecido emborrachado para atenuar a interferência do ar, do som e da luminosidade nos experimentos;
- Introduzir um sistema de freio hidráulico com acionamento mecânico para permitir a parada precisa da cadeira, sem a interferência da mão humana;
- Introduzir um dispositivo semelhante ao manche de uma aeronave de caça (*joystick*) a fim de proporcionar a execução dos diversos comandos em vôo;
- Desenvolver um aplicativo para a captação dos sinais do manche (*joystick*) de forma a permitir a quantificação da desorientação espacial;
- Introduzir uma microcâmera com captação infravermelho e unidade transmissora do sinal;
- Introduzir um HUB USB sem fio (WUSB) de maneira a permitir a transmissão de sinal dos componentes que sofrem rotação junto com a cadeira para um computador localizado numa estrutura fixa;

- Introduzir um monitor com boa amplitude de tela, com baixo peso e espessura reduzida, a fim de viabilizar a projeção de imagens do software de simulação de vôo no interior da cobertura da cadeira;
- Introduzir um dispositivo de expansão de portas com interface USB para propiciar o acoplamento do monitor de vídeo e o *joystick* numa mesma interface USB com o dispositivo HUB USB sem fio;
- Introduzir um software de simulação de vôo para proporcionar a execução dos diversos perfis de vôo necessários aos experimentos;
- Introduzir um conector rotativo a fim de viabilizar a alimentação elétrica dos componentes em rotação incorporados à cadeira;
- Introduzir uma régua para distribuição de energia elétrica aos diversos equipamentos incorporados e que sofrem rotação junto com a cadeira.

1.6 Estrutura da Dissertação de Mestrado

A partir dos objetivos elencados no item imediatamente anterior (1.5), este trabalho foi estruturado de forma seqüencial, a partir deste primeiro capítulo, que apresenta a Introdução, a Motivação, a Identificação do Problema, a Hipótese e os Objetivos, além da descrição da Estrutura da Dissertação contida neste item.

No capítulo 2 se faz a apresentação da Fundamentação Teórica com base em revisão bibliográfica a respeito dos seguintes temas: Sistemas Humanos de Orientação Espacial e de Equilíbrio, Sistema Visual, Sensibilidade ao Som e ao Movimento, Sistema Proprioceptivo, Desorientação Espacial, Simuladores de Vôo e Cadeira de Bárány.

A seguir, o capítulo 3 contempla os Materiais e Métodos utilizados no desenvolvimento das diversas soluções propostas como objetivos deste trabalho.

O capítulo 4 traz os Resultados e Discussões a respeito de cada um dos itens elencados como objetivos, apresentando-os na mesma seqüência e estrutura.

Fechando esta dissertação, o capítulo 5 apresenta as Conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“O homem não nasceu para voar!” Mais do que uma frase feita, esta expressão encerra um significado cabal, pois a fisiologia humana não favorece a que o ser humano possa desempenhar atividade no meio aéreo, ou mesmo espacial, sem sofrer conseqüências, muitas vezes, desastrosas. Ainda que haja alguma possibilidade de adaptação fisiológica ao ambiente aéreo, o desempenho humano em tais condições, não ocorre de forma confiável. Na pré-história, o homem olhava para o céu e observava pássaros voando, criando fantasia, sonho de poder voar (DEHART, 1996). A evolução humana vem acontecendo ao longo de milhares de anos, sendo que há aproximadamente 40.000 anos tem-se uma morfologia estável, sem muitas mudanças. Ao se adotar o crânio humano como referência a esse padrão de evolução, evidencia-se que praticamente não ocorreram mudanças em milhares de anos (Figura 10).

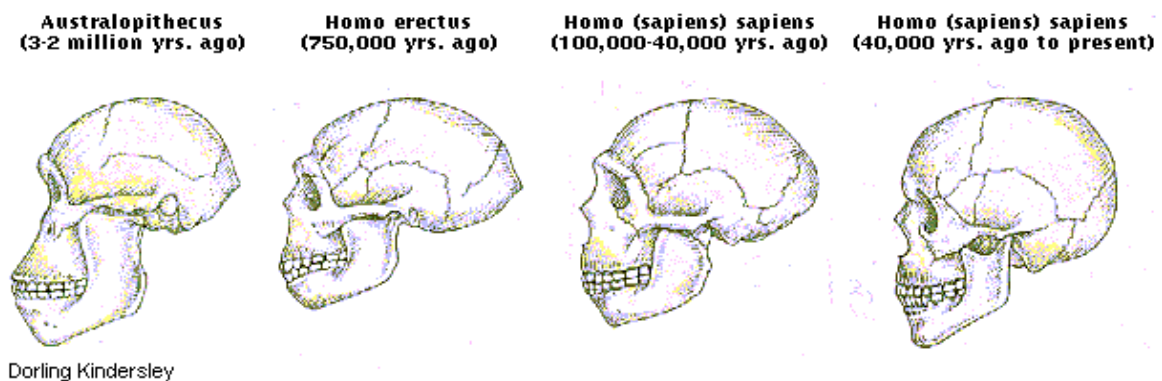


Figura 10 - Modelos de crânio humano exemplificando a evolução.
Fonte: Microsoft® Encarta Enciclopédia (1998).

Em termos fisiológicos, portanto, o homem permanece o mesmo, ao longo de centenas de séculos. Esse processo evolutivo, durante muito tempo, teve como principal agente os elementos da natureza, os quatro elementos, a terra, o fogo, a água e o ar, com destaque para este último, representado pelo oxigênio e pressão atmosférica e a terra, com a força da gravidade. Assim, adaptando-se à indispensável sobrevivência para garantia de continuidade da espécie, o homem é fruto de um

processo de causa e efeito, tendo, de um lado, os agentes ambientais, de outro, a reação humana. A coexistência com outras espécies de seres vivos, no entanto, a partir de um processo de seleção natural agregou outro elemento transformador na evolução humana – a sobrevivência.

A necessidade de sobreviver num ambiente dominado pela força da natureza e de superar outras espécies mais fortes fez com que os sistemas e sentidos humanos fossem se desenvolvendo em prol desses objetivos. Assim, dado esse cenário para a evolução humana, a visão exerceu papel preponderante em relação aos demais sentidos (GUYTON, 1989). O olfato, a audição, a gustação e o tato exerceram funções secundárias. Estes sistemas foram se desenvolvendo, sempre adaptados à ação da gravidade (força acelerativa constante, que atua de cima para baixo, em direção ao centro da Terra). Assim, dotado de dois olhos à frente do crânio e equilibrando-se sobre dois pés, conduzido pela inteligência, o ser humano vem evoluindo, num longo processo, mantendo sempre a referência de localização e equilíbrio voltada para o contato com o solo.

Desta forma, a ascensão na atmosfera, no século XVIII, iniciaria uma escalada com desafios cada vez maiores ao homem, pois surgia uma possibilidade muito diferente de tudo o que até então existiu e o mantinha preso ao chão, sobre a água ou imerso nesta: o ambiente aéreo!

No meio aéreo e, posteriormente, aeroespacial, dentre as diversas situações hostis aos humanos, destaca-se a baixa pressão parcial de oxigênio (hipóxia de altitude), a diminuição da pressão barométrica (disbarismo), a queda da temperatura em altitude (hipotermia) e, em certas condições, a falta de referenciais de localização (desorientação espacial). Muitos outros aspectos poderiam ser abordados, sendo que o enfoque deste trabalho reside na dificuldade de o homem orientar-se no ambiente aeroespacial.

A razão para tal enfoque é que existem mecanismos e equipamentos diversos desenvolvidos para que o ser humano possa enfrentar o ambiente aeroespacial: para contornar a hipóxia e a baixa pressão atmosférica, desenvolveu a cabine pressurizada, suprimento de oxigênio e traje pressurizado; além disso, há alguma compensação fisiológica, por exemplo, quando um piloto ascende na atmosfera e alcança 10.000 pés,

sendo que o organismo, na presença de uma baixa pressão parcial do oxigênio, aumenta a frequência cardíaca (taquicardia) e respiratória (taquipnéia), aumenta a amplitude do movimento respiratório (hiperpnéia) e eleva a pressão arterial (ERNSTING, 1998). Tais mecanismos compensatórios, que atuam numa situação de exposição à atmosfera em altitude, sem proteção de cabine pressurizada ou uso de oxigênio suplementar, ocorrem imediatamente, tão logo se inicie a exposição. Ainda, se a exposição persistir, o organismo promoverá uma adaptação (aclimatação) à altitude, a partir de mecanismos mais lentos, ocorrendo aumento de produção de glóbulos vermelhos (poliglobulia), aumento do diâmetro destes glóbulos e elevação da concentração de hemoglobina nestes mesmos glóbulos (DEHART, 1996). Tais mecanismos conferem uma melhor capacidade de captar o oxigênio quando oferecido ao organismo, de forma crônica, a exemplo do que ocorre com os povos que habitam os Andes e o Himalaia; da mesma forma, a tecnologia supera tanto as baixas quanto as altas temperaturas, com as cabines climatizadas e sistemas de aquecimento ou de refrigeração; também é possível adaptar-se a tais condições, a exemplo dos Esquimós, que vivem em temperaturas extremamente baixas (-30°C); no outro extremo, os povos do deserto convivem com $+40^{\circ}\text{C}$ (GUYTON, 1989). No entanto, no que diz respeito à orientação, não há qualquer possibilidade de adaptação, no caso de alteração dos referenciais conhecidos captados pelos diversos sistemas, principalmente pela visão, como ocorre no vôo por instrumentos, o que pode levar à desorientação (BENSON, 1998).

Assim, ao perder o referencial visual em vôo, por exemplo, o organismo humano busca orientar-se a partir de outros referenciais, como as informações provenientes do sistema vestibular e proprioceptivo. Como a resultante de força acelerativa pode variar quanto ao eixo e no sentido cabeça-pé (GZ+), surge uma condição na qual o ser humano pode perder a capacidade de se orientar. Diferentemente do que ocorre numa situação de hipóxia associada ao vôo, onde o organismo dispõe de alguns mecanismos compensatórios ao déficit de oxigenação (elevação da frequência cardíaca, elevação da frequência respiratória com aumento da amplitude, aumento da pressão arterial), no caso de uma desorientação, não há

qualquer possibilidade de os órgãos relacionados promoverem ajustes, em virtude das características desses sistemas (DEHART, 1996).

No ambiente terrestre, ao perder a informação visual, por exemplo, ao ingressar num recinto escuro, o ser humano mantém o equilíbrio e o senso de orientação no espaço à custa de receber informações vestibulares e proprioceptivas que indicam a posição do seu corpo (se está ereto ou não), o posicionamento de cada uma das partes, bem como do corpo em relação ao espaço.

No entanto, numa condição de referências visuais precárias, como no vôo por instrumento (piloto voa baseando-se apenas nas informações dos instrumentos do painel em função de perder o contato visual com o solo), passam a predominar as informações vestibulares, cujo sistema atua por inércia de um líquido (endolinfa), complementadas pelas informações proprioceptivas (BENSON, 1998).

A orientação do indivíduo nessa situação pode ficar comprometida à custa de conflito entre os três sistemas envolvidos. A visão, o sistema vestibular e o proprioceptivo, originariamente, atuando em sintonia em condições de referências visuais e em contato do ser humano com o solo, passaram a enfrentar uma condição muito diferente dessa, a partir do domínio do ambiente aéreo e espacial por parte do homem (TREDICI, 1996).

Na aviação de caça e na de asas rotativas, também, pela própria característica de vôo dessas aeronaves, a desorientação espacial se faz presente com mais ênfase, a ponto de provocar um elevado número de intercorrências que afetam diretamente a segurança de vôo. Há que se considerar sempre os aspectos relacionados ao equilíbrio e à orientação espacial, como as sensações e as ilusões, a ponto de se investir na melhoria da capacidade de o aeronavegante enfrentar estas variáveis. As sensações são provenientes do sistema vestibular e do sistema proprioceptivo. Dentre os exemplos, um dos mais conhecidos é quando o aviador confunde reações do seu corpo frente à aceleração da gravidade e força centrífuga, uma vez que atuam no corpo por uma resultante, provocando uma desorientação rotacional. Pode ocorrer, por exemplo, de a aeronave estar em curva, com velocidade constante, e, ao reduzir a velocidade, o piloto ter a sensação de que a aeronave iniciou curva para o lado oposto (Figura 11).

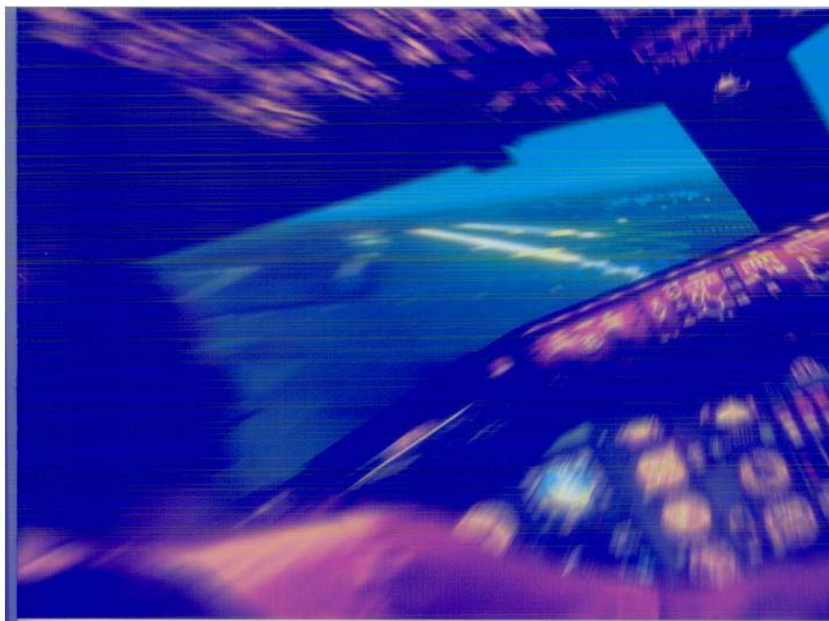


Figura 11 - Aeronave em aproximação para pouso no simulador.
Fonte: www.airliners.net

Desta forma, o aprofundamento do conhecimento a respeito dos mecanismos envolvidos na desorientação espacial e o desenvolvimento de tecnologia para treinamento de pilotos são apenas algumas das muitas interfaces possíveis a serem mencionadas.

Inicialmente, cabe detalhar a anatomia e fisiologia dos diversos sistemas envolvidos no equilíbrio e na orientação espacial, em condições normais, conforme será abordado a seguir.

2.1 Sistemas Humanos de Orientação Espacial e de Equilíbrio

O sistema humano de orientação espacial e de equilíbrio se dá por meio de informações obtidas a partir da atuação do sistema visual, do aparelho vestibular e do sistema proprioceptivo (GUYTON, 1989) (Figura 12).

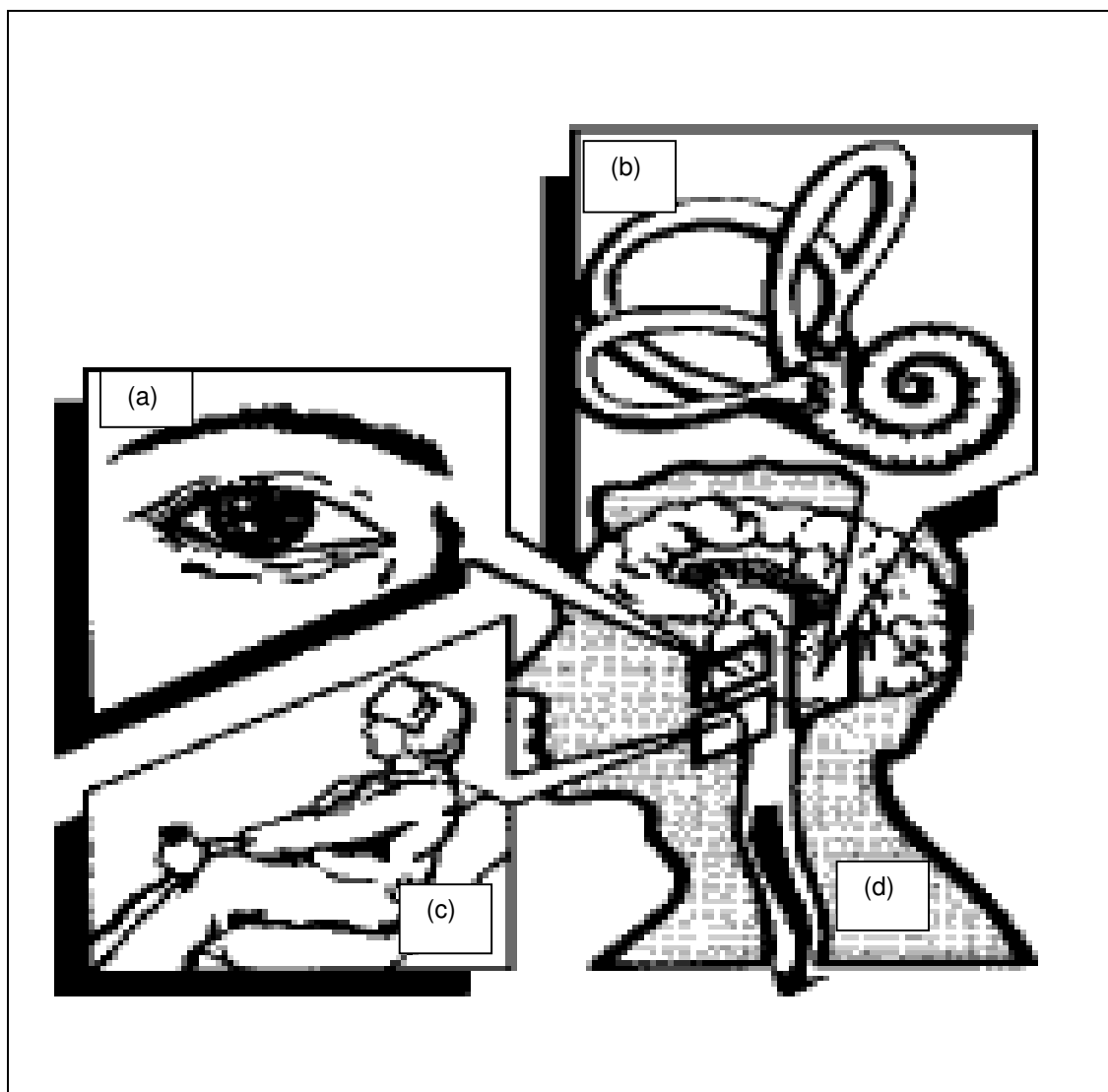


Figura 12 - Esquema demonstrativo dos sistemas humanos de orientação espacial e de equilíbrio: sistema visual (a); sistema vestibular (b); sistema proprioceptivo (c); cérebro (d).

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety>

Diversas etapas compõem o processamento dessas informações: percepção, captação, condução, integração e interpretação. Na etapa da percepção, as informações visuais, vestibulares e proprioceptivas são detectadas pelos diversos sentidos envolvidos, sendo captadas e enviadas (condução) ao cérebro (sistema nervoso central – SNC). No SNC há integração das informações, por meio de comparação e checagem cruzada de tudo o que foi captado e transmitido. O processamento no cérebro (SNC) é muito rápido e segue-se a interpretação das

informações consideradas “válidas”, para que a (re) ação seja determinada (GUYTON, 1989).

Ainda que os sistemas humanos de orientação espacial e de equilíbrio sejam bastante desenvolvidos, a condição de vôo sem referências visuais adequadas continua a representar um grande desafio à segurança de vôo, pois é capaz de produzir danos e perdas imensas, a partir da desorientação espacial (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Assim, para que se consiga demonstrar a importância do desenvolvimento de um dispositivo para quantificar a desorientação espacial, faz-se necessário explicar, primeiramente, a anatomia e a fisiologia do sistema visual humano.

2.1.1 Sistema Visual

A visão é o mais importante dos sentidos e responde por mais de 80% da capacidade humana de orientação espacial, exercendo papel preponderante em relação aos demais sistemas (vestibular e proprioceptivo) (TREDICI, 1996).

O sistema visual é altamente complexo e compõe-se de inúmeros processos relacionados que vão desde a captação de imagens até o processamento das imagens no cérebro. Há que se considerar, também, como parte da visão, a percepção visual, cuja teoria postulada por Hermann Von Helmholtz (inferência inconsciente), por si só, poderia representar um tratado, o que não é o foco deste trabalho. No entanto, tanto essa teoria quanto a Teoria da Gestalt (termo intraduzível do alemão, utilizado para abarcar a teoria da percepção visual baseada na psicologia da forma) agregam importantes elementos à compreensão do que ocorre na percepção visual de um piloto e como isso pode determinar maior ou menor suscetibilidade à desorientação espacial.

A Teoria da Gestalt afirma que não se pode ter conhecimento do todo através das partes e, sim, das partes através do todo; que os conjuntos possuem leis próprias e estas regem seus elementos; e que só através da percepção da totalidade é que o cérebro pode de fato perceber, decodificar e assimilar uma imagem ou um conceito. Assim, na interpretação das informações captadas, o que é considerado “válido” pelo

cérebro pode conter impropriedades em função de interações que ultrapassam a “simples” decodificação de estímulos luminosos. Pode haver conflito nas informações percebidas não somente pelos três sistemas ligados à orientação espacial, mas, também, devido às interligações entre eles, bem como com outras áreas do cérebro, responsáveis, por exemplo, pelas emoções e pela memória. Portanto, ao abordar a desorientação espacial, este trabalho o faz, da mesma forma, enfocando a percepção visual.

Considera-se, por conseguinte, tanto o processo relacionado à pura percepção física da luz (forma de um objeto, por exemplo) quanto à representação (a forma visual do objeto tem um sentido particular a cada ser humano). Esses processos ocorrem ao mesmo tempo – percepção sensorial e representativa – sendo que vão se completando até que seja finalizado o processo de percepção visual.

Em seu processo evolutivo, o homem se pôs de pé e com a cabeça ereta. Nessa posição, o cérebro recebe informação visual dos olhos que captam imagens que indicam a atitude – corpo em relação ao ambiente e olhos em relação ao horizonte – sendo tudo confirmado pelas informações vestibulares que dão conta de que a cabeça realmente se encontra alinhada com o corpo, sem inclinações, acima deste, a partir da análise das resultantes das forças acelerativas naquele momento, preponderando a ação da gravidade. O sistema proprioceptivo confirma que a pressão sob a planta dos pés, a distensão de determinados músculos e tendões e posição das articulações estão de acordo com o que está sendo percebido pelo sistema visual e ratificado pelo aparelho vestibular (GUYTON, 1989).

2.1.1.1 Anatomia e Fisiologia do Sistema Visual

O sistema visual consiste do olho (transforma a luz em um sinal neuronal), dos nervos óticos (transportam o sinal até o SNC) e do cérebro (processa o sinal neuronal, integra e interpreta as informações). No cérebro é que ocorre o processo de análise e

interpretação que permite reconstruir as distâncias, cores, movimentos, formas dos objetos e do mundo que rodeia o homem.

O olho pode ser considerado como um dispositivo que captura a luz e a focaliza numa camada de fundo – a retina – considerada por alguns autores como uma extensão do SNC, portanto, mais afeta a este do que ao olho propriamente dito (GRAY, 1979).

O cérebro também tem a função de inverter a imagem que é projetada de forma invertida na retina, a fim de que se perceba tudo em posição normal e, não, de cabeça para baixo.

O globo ocular recebe este nome por ter a forma de um globo, que por sua vez fica acondicionado dentro de uma cavidade óssea e protegido pelas pálpebras, cílios e contando com a lubrificação da lágrima produzida nas glândulas lacrimais (Figuras 13 e 14).

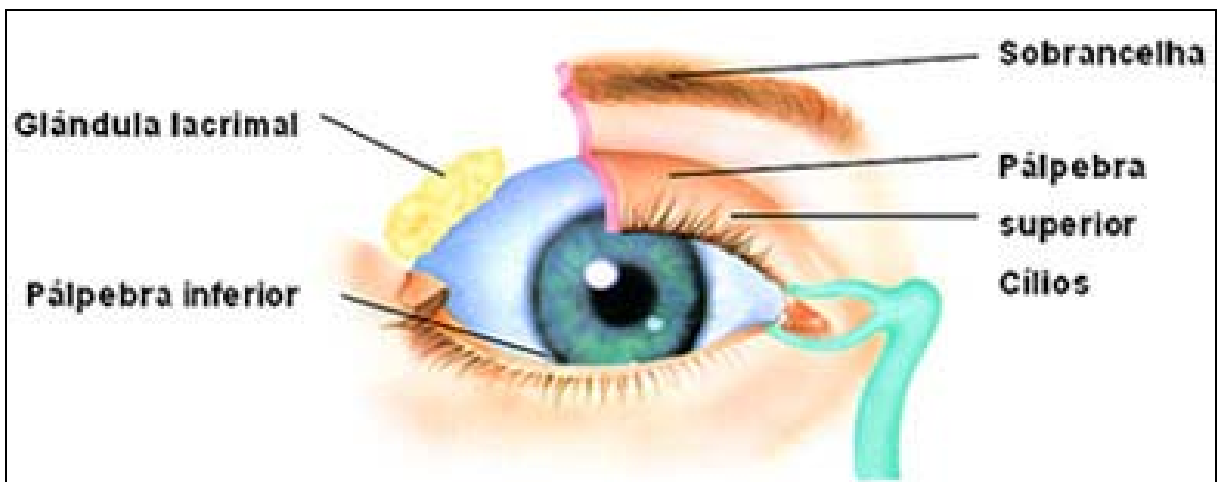


Figura 13 - Estruturas externas ao globo ocular: como função servem tanto para proteção quanto para lubrificação.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/olho_humano

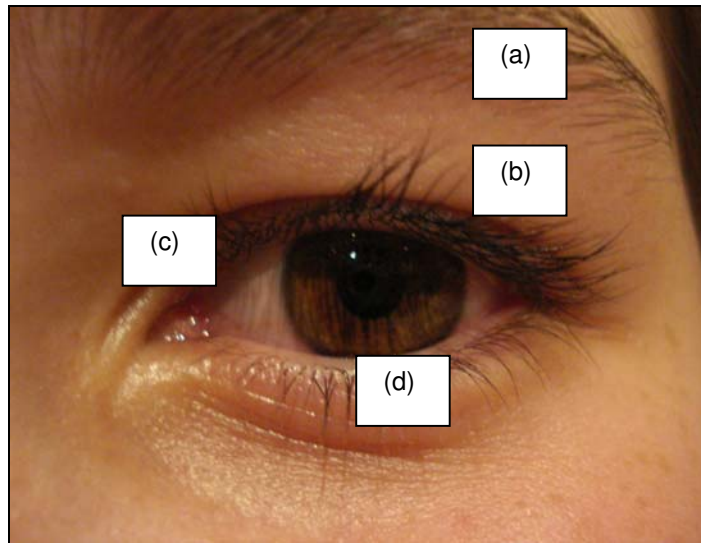


Figura 14 - Vista exrterna do olho humano: sobrancelha (a); cílios (b); pálpebra superior (c); pálpebra inferior (d).
Fonte: Autor (2007).

Possui em seu exterior seis músculos que são responsáveis pelos movimentos oculares (Figuras 15 e 16), sendo que, em função da contração e relaxamento de cada um deles, se torna possível a movimentação do globo ocular (GUYTON, 1989).

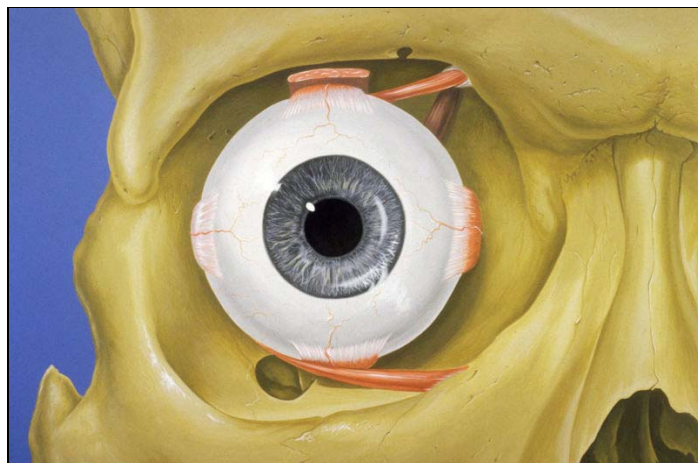


Figura 15 - Posição do globo ocular na cavidade óssea.
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/olho_humano



Figura 16 - Fixação do globo ocular na cavidade pela musculatura ocular.

Fonte: http://www.adefib.org.br/links/Artigos/COMO_FUNCIONA_O_OLHO_HUMANO.doc

O globo ocular tem uma estrutura complexa, sendo que conta com três camadas concêntricas aderidas entre si com a função de visão, nutrição e proteção formada por diversos elementos, como pode ser visto no esquema abaixo (Figura 17). Opticamente, pode ser comparado a uma câmara fotográfica, ainda que seja uma comparação grosseira, por possuir um sistema de lentes, um sistema de diafragma (pupila) e a retina (filme).

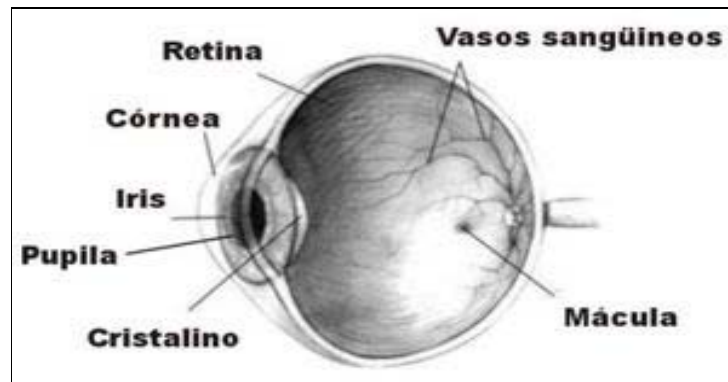


Figura 17 - Partes do globo ocular.
 Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/olho_humano

Há três camadas ou túnicas que formam o globo ocular: a mais externa – a esclerótica – formada pela esclera e a córnea; uma camada média ou intermediária – a coróide; e a camada mais interna – a retina – onde se localizam as células responsáveis pela captação da luz, os cones e bastonetes. Em contato com a superfície externa, a conjuntiva reveste o globo ocular. A camada média exerce uma importante função a partir da coróide, que juntamente com o corpo ciliar e íris, formam a úvea; nesta camada se localiza a vascularização, além de ser a responsável pela importante função de isolamento do globo ocular, como numa câmara fotográfica, cujo interior é protegido da luz. Tal funcionalidade ocorre graças ao tecido conjuntivo que a compõe, rico em vasos e em melanócitos (células que produzem melanina) (GUYTON, 1989).

A forma do globo ocular é dada pelo corpo vítreo e esclera; a córnea, localizada na parte frontal do olho, é o elemento que mantém o contato com o mundo externo. Consiste de uma membrana firme e transparente, cuja principal função é refratar a luz. O seu formato abaulado age convergindo a luz, como uma lente de câmara fotográfica, o que a torna parte importante do sistema ótico, que compreende também o cristalino (GRAY, 1979).

O globo ocular divide-se em duas câmaras, anterior e posterior, separadas pela íris, que atua como um diafragma, permitindo uma maior ou menor passagem de luz para dentro do globo ocular. Atrás da córnea, a câmara frontal contém o humor aquoso, que é um líquido claro. A cor da íris determina a cor dos olhos. Quando dizemos que uma pessoa tem olhos azuis, queremos dizer que as íris são azuis. Os padrões e

detalhes da íris humana não se repetem entre as pessoas, sendo tão únicos quanto às impressões digitais. No centro da íris, um pequeno orifício redondo – a pupila – controla a quantidade de luz que entra no olho (Figura 18).

O diâmetro da pupila está entre 1.5 mm a 8 mm, com o menor diâmetro correspondendo à maior exposição ao brilho da luz. Atrás da íris está o cristalino, que consiste de muitas fibras transparentes encaixadas numa membrana elástica transparente (GRAY, 1979).

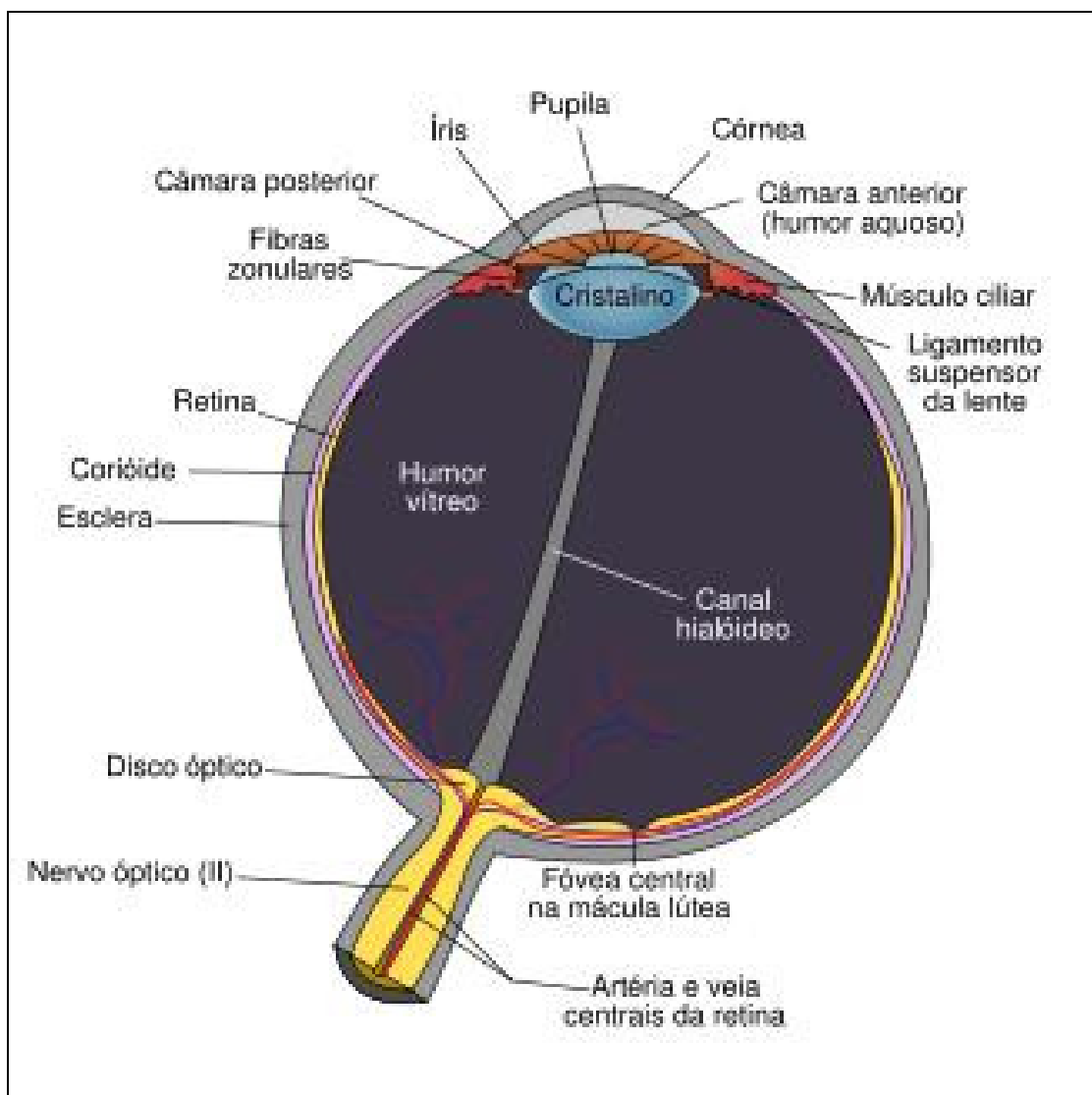


Figura 18 - Globo ocular humano e suas diversas estruturas.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/olho_humano

O cristalino é uma espécie de lente formada por fibras viscosas, proteináceas, transparentes, como se fosse uma cebola, cuja parte mais antiga está no centro e cresce ao longo de toda a vida. Tem uma forma biconvexa, sendo o maior responsável pela capacidade de foco do olho humano; não possui vascularização e é nutrido pelo humor vítreo, num processo de diálise devido à qualidade semipermeável da cápsula que o envolve (GUYTON, 1989); as outras partes do olho que auxiliam no foco são a curvatura da córnea, além dos líquidos do humor vítreo e humor aquoso, através dos quais a luz passa para incidir na retina. Quando está em estado de relaxamento, sem nenhuma tensão em sua cápsula, a lente assume a forma esférica.

A funcionalidade ótica deste sistema é como uma lente, cujo mecanismo de aumentar ou diminuir a convergência – a acomodação – permite a visão nítida em diferentes distâncias. Tal mecanismo perde eficiência ao longo do tempo. O poder dióptrico do cristalino é de apenas 15 dioptrias. No entanto, o poder dióptrico do olho humano é de 59 dioptrias, somando-se os demais índices de refração das demais estruturas que compõem a parte ótica do sistema visual humano (GUYTON, 1989).

A retina é um tecido fundamental para o funcionamento do olho e trabalha como o filme numa máquina fotográfica. A imagem é focalizada diretamente nela, que reveste os 2/3 posteriores da parte interna do olho. Sua função é receber as imagens, formá-las e enviá-las para o cérebro, sob a forma de impulsos nervosos. As imagens se formam com maior nitidez na mácula, sendo mais precisas ainda na fóvea (região central da mácula). A retina é a região fotossensível do olho, que contém os cones, principais responsáveis pela visão central, nítida e a cores (cromática) e os bastonetes, cuja função está afeta à visão com pouca luminosidade (escotópica). Quando os cones e bastonetes (neurônios I) são excitados, os sinais são transmitidos através de neurônios sucessivos (II e III) na própria retina e, em seguida, pelas fibras do nervo ótico até o córtex cerebral (GUYTON, 1989).

Depois que a luz passa pelo sistema de lentes do olho e atravessa o humor vítreo, ela chega à retina pela parte interna desta e permeia nove camadas até chegar aos cones e bastonetes (camada mais externa da retina). Cabe destacar que nas diversas camadas da retina distinguem-se três neurônios: cones e bastonetes (neurônios I), células bipolares (neurônios II) e células ganglionares (neurônios III).

Uma pequena área no centro da retina, denominada mácula, é uma região que ocupa menos de 1 mm², cuja função é fornecer uma visão nítida e detalhada. A porção central da mácula, de apenas 0,4 mm de diâmetro, denomina-se fóvea. Nesta região diversas camadas estão deslocadas para o lado, ao invés de se situarem sobre os cones, o que permite que a luz incida diretamente sobre estas células, permitindo uma visão de alta acuidade (TREDICI, 1996).

Os cones e bastonetes são neurônios que atuam como células fotorreceptoras, cuja denominação decorre de seu formato à semelhança de um cone e de um pequeno bastão, respectivamente. O mecanismo responsável pela absorção da luz é derivado de um processo químico que envolve um pigmento fotossensível denominado rodopsina. A característica de absorção do estímulo luminoso pelos cones e bastonetes está ligada ao tipo de pigmento fotossensível que existe em cada um dos tipos de células (GUYTON, 1989).

A decomposição da rodopsina ao absorver a luz causa alteração na condutância das membranas dos cones e bastonetes aos íons sódio, o que determina diferentes potenciais elétricos, relacionados às diferentes condições de luminosidade. Cada retina contém cerca de 125 milhões de bastonetes e 5,5 milhões de cones (GUYTON, 1989).

A curiosidade é de que cerca de apenas 1.000.000 fibras óticas saem de cada retina para o cérebro, o que faz com que exista uma convergência de aproximadamente 125 bastonetes e 5 cones para cada fibra do nervo ótico. Entretanto, há importantes diferenças entre a retina periférica e a central, pois, quanto mais perto da fóvea, há cada vez menos cones e bastonetes convergindo sobre cada fibra ótica. Na fóvea, não há bastonete e o número de fibras óticas é o mesmo do número de cones (visão de alta definição). Nas regiões periféricas da retina, há cerca de 300 bastonetes convergindo para cada fibra ótica, o que dá a sensibilidade maior à baixa luminosidade. Os diferentes potenciais dos cones e bastonetes são transmitidos pelos corpos destes receptores para os corpos sinápticos em sua outra extremidade, por condução direta da própria voltagem elétrica (GUYTON, 1989).

A visão a cores é dada em função de pigmentos especiais existentes somente nos cones e que são responsáveis pela absorção de diferentes espectros de luz, que

correspondem a diferentes comprimentos de onda (vermelho, verde e azul). Assim, a estimulação de cones por diferentes comprimentos de onda de feixes luminosos será interpretada pelo cérebro como uma ou outra cor (TREDICI, 1996).

A combinação destes estímulos poderá causar sensação de outra cor diferente da que está sendo lançada na origem sobre a retina. Não existe comprimento de onda que corresponda à luz branca, ou seja, esta cor é interpretada pelo cérebro a partir de uma estimulação aproximadamente igual de todos os cones vermelhos, verdes e azuis. No corpo sináptico, há liberação de substância neurotransmissora. No escuro, há um estado de despolarização dos receptores, sendo que, na condição de iluminação total, há hiperpolarização (GUYTON, 1989).

2.1.1.2 Via Ótica

A partir da transformação do estímulo luminoso em impulso nervoso se inicia o processo de transmissão para o cérebro, sendo que os primeiros neurônios (neurônios I) envolvidos são os cones e bastonetes. A luz incide na retina de forma a atravessar as diversas camadas até alcançar a mais externa, onde estão os cones e bastonetes, sensibilizando-os. Após, o estímulo nervoso segue em direção ao cérebro.

A transmissão do estímulo segue às células bipolares (neurônios II) e, destas, às células ganglionares (neurônios III), que transmitem os sinais ao cérebro pelos axônios que formam as fibras do nervo ótico, sob a forma de potenciais de ação. Essas células, mesmo quando não estimuladas, transmitem continuamente impulsos nervosos ao cérebro numa frequência de 5 por segundo (GUYTON, 1989).

O sinal visual é superposto a esse nível básico de estimulação das células ganglionares. Ele pode ser excitatório, aumentando para mais de 5 por segundo, ou um sinal inibitório, com o número de impulsos nervosos para menos de 5 por segundo, muitas vezes até zero (Figura 19).

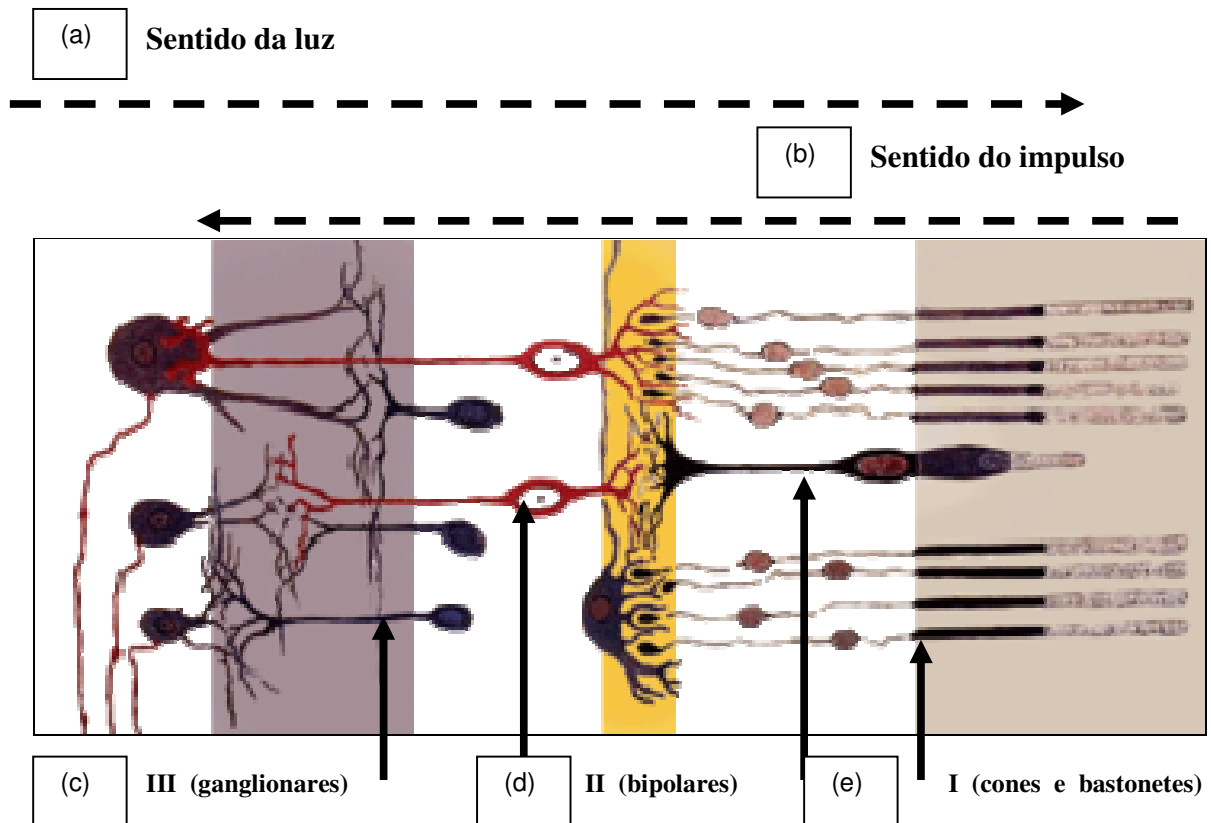


Figura 19 - Ilustração da retina: sentido da luz (a); sentido do impulso nervoso (b); neurônios III (c); neurônios II (d); neurônios I (e).

Fonte: www.adefib.org.br/links/Artigos/COMO_FUNCIONA_O_OLHO_HUMANO.doc

Os nervos óticos dos dois lados convergem para formar o quiasma ótico, do qual se destacam, posteriormente, os dois tractos óticos, que terminam nos respectivos corpos geniculados laterais (GUYTON, 1989).

A fim de facilitar a compreensão da captação e transmissão do estímulo visual, faz-se necessário esclarecer algumas denominações como: retina nasal e retina temporal. A retina nasal corresponde à metade medial da retina que fica voltada para o nariz e a retina temporal à metade da retina de cada olho que está voltada para a região temporal (MACHADO, 1981).

Denomina-se campo visual de um olho a porção do espaço que pode ser vista por esse olho estando ele fixo. No campo visual de cada olho, portanto, distingue-se, como na retina, uma porção lateral (campo temporal) e uma porção medial (campo

nasal). É fácil verificar pelo trajeto dos raios luminosos que o campo nasal se projeta sobre a retina temporal e o campo temporal sobre a retina nasal. Contudo, convém lembrar que no homem e em muitos animais há superposição de parte dos campos visuais dos dois olhos, constituindo o chamado campo binocular.

No quiasma ótico, as fibras oriundas da retina nasal cruzam para o outro lado, enquanto as fibras da retina temporal seguem do mesmo lado, sem cruzamento (MACHADO, 1981).

Assim, cada trato ótico contém fibras temporais da retina de seu próprio lado e fibras nasais da retina do lado oposto. Como consequência, os impulsos nervosos originados em metades homônimas das retinas dos dois olhos serão conduzidos aos corpos geniculados e ao córtex deste mesmo lado. Tal peculiaridade do quiasma ótico é denominada decussação parcial (Figura 20) (MACHADO, 1981).

Desta forma, também na via ótica, é válido o princípio de que o hemisfério cerebral de um lado relaciona-se com as atividades motoras e sensitivas do lado oposto. Conforme seu destino pode-se distinguir três tipos de fibras no tracto ótico: fibras retino-tectais (relacionadas com determinados reflexos dos olhos, por exemplo, o piscar); fibras retino-pré-tectais (relacionadas com os reflexos fotomotor direto e consensual); e fibras retino-geniculadas, que são as mais importantes, pois, somente elas se relacionam com a visão.

Os axônios do corpo geniculado lateral (neurônios IV) constituem a radiação óptica e terminam na área visual (área 17), situada nos lábios do sulco calcarino (MACHADO, 1981).

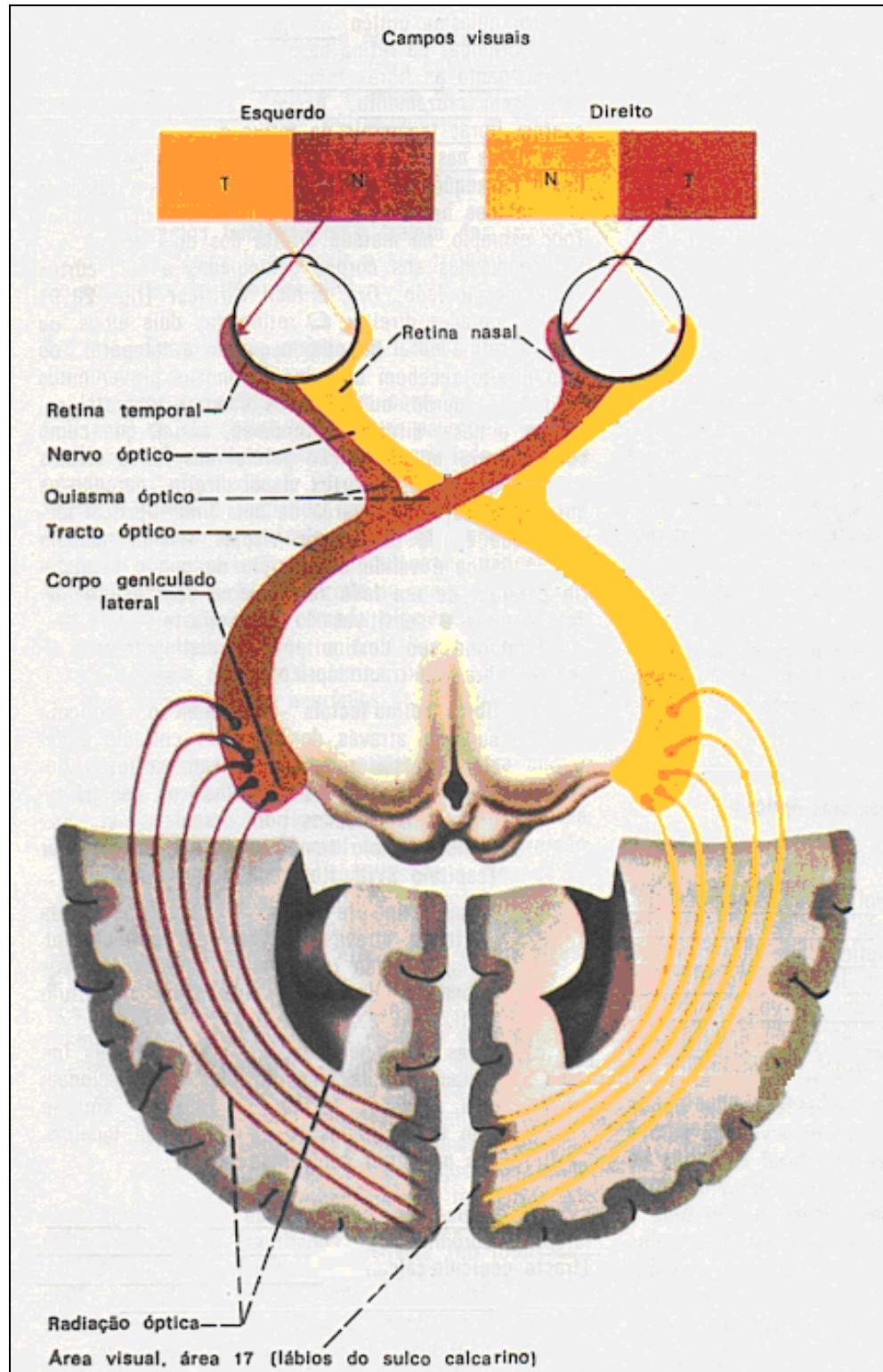


Figura 20 - Campos visuais, retina, quiasma, trato óptico e radiação óptica.
 Fonte: MACHADO, A. Neuroanatomia Funcional. 1ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Atheneu, 1981. p. 248

2.1.1.3 Controle ocular

Quase tão importante quanto o sistema de interpretação das imagens é o sistema de controle cerebral que permite direcionar os olhos no sentido do objeto a ser visualizado, a fim de que haja a captura da imagem.

2.1.1.3.1 Controle Muscular dos Movimentos Oculares

Os movimentos são controlados por três pares separados de músculos (figura 21): os músculos retos medial e lateral, os retos superior e inferior e os oblíquos superior e inferior. Os músculos retos medial e lateral são os responsáveis pela movimentação de um lado a outro, os retos superior e inferior pelos movimentos para cima a para baixo e os oblíquos superior e inferior pelos movimentos de rotação dos olhos, mantendo os campos visuais na posição correta (GUYTON, 1989).

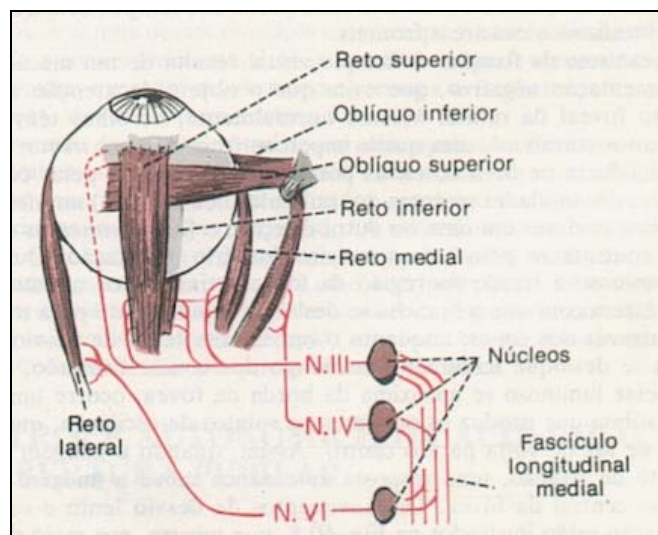


Figura 21 - Músculos oculares e inervação: III, IV e VI pares cranianos.

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 577

Talvez os movimentos mais importantes dos olhos sejam os que permitem que se fixem numa parte específica do campo visual. Os movimentos de fixação são controlados por dois mecanismos neurais diferentes. O primeiro permite que uma pessoa movimente voluntariamente os olhos em busca do objeto sobre o qual deseja fixar a visão – o mecanismo de fixação voluntária. O segundo é um mecanismo involuntário, que mantém os olhos firmes sobre o objeto, uma vez encontrado, denominado mecanismo de fixação involuntária (Figura 22) (GUYTON, 1989).

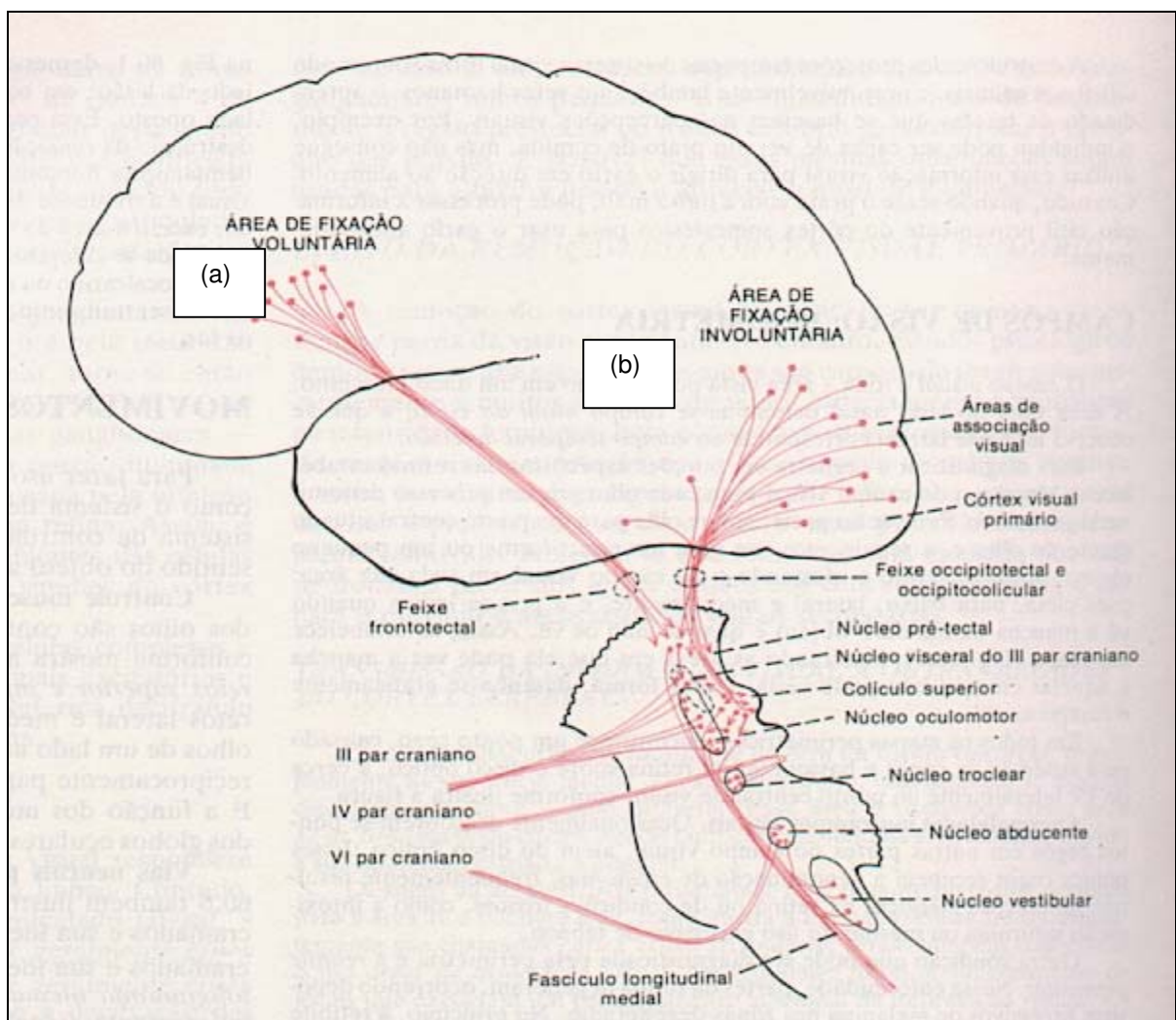


Figura 22 - Esquema demonstrando os mecanismos de fixação dos olhos: área de fixação voluntária (a); área de fixação involuntária (b).

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 578

2.1.1.3.2 Vias Neurais para Controle dos Movimentos Oculares

Os músculos oculares recebem inervação dos núcleos do terceiro, quarto e sexto pares cranianos. Esses núcleos, por sua vez, estão interligados pelo fascículo longitudinal medial, que inerva reciprocamente cada um dos olhos, de forma a que quando um músculo do par se contrai, o outro se relaxa. Há propagação dos sinais visuais a partir de áreas visuais corticais occipitais através dos feixes occipitotectais e occipitocoliculares para área pré-tectal e do colículo superior do tronco encefálico. Há também um feixe frontotectal que passa do córtex frontal à área pré-tectal. Das áreas pré-tectal e do colículo superior os sinais do controle oculomotor passam, então, aos núcleos dos nervos oculomotores. Sinais intensos também são transmitidos ao sistema oculomotor, provenientes dos núcleos vestibulares, através do fascículo longitudinal medial (GUYTON, 1989).

2.1.1.3.3 Controle Vestibular dos Movimentos Oculares

A estimulação do sistema vestibular causa movimentos dos olhos. Os núcleos vestibulares estão conectados diretamente aos núcleos do tronco cerebral, que controlam os movimentos oculares, e sempre que a cabeça é acelerada numa direção vertical, longitudinal, lateral ou angular, produz-se de imediato um movimento compensatório dos olhos na direção oposta. Isso permite que os olhos se mantenham fixados sobre um objeto que desperta atenção, apesar dos movimentos rápidos do corpo ou da cabeça.

O controle vestibular ocular tem particular importância quando durante movimentos bruscos de todo o corpo, a exemplo de um piloto que necessita manter os olhos fixos no painel da aeronave, por exemplo, num vôo em condições de IFR, sob grande turbulência (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.1.1.4 Percepção Visual

Muitos psicólogos cognitivos e filósofos de diversas escolas sustentam a tese de que, ao transitar pelo mundo, as pessoas criam um modelo mental de como o mundo funciona, ou seja, elas sentem o mundo real, mas o mapa sensorial que isso provoca na mente é provisório, da mesma forma que uma hipótese científica é provisória até ser comprovada ou refutada ou novas informações serem acrescentadas ao modelo. À medida que se adquire novas informações, a percepção se altera. As ilusões de óptica e alguns jogos, como o dos sete erros, se baseiam nesse fato. Algumas imagens ambíguas são exemplares ao permitir ver objetos diferentes de acordo com a interpretação. Há diversas teorias e abordagens a respeito da percepção visual humana. (SANTOS; SIMAS, 2001).

Em uma imagem “mutável”, não é o estímulo visual que muda, mas apenas a interpretação que se faz desse estímulo. Na imagem abaixo (Figura 23) pode-se ver um pato ou um coelho, dependendo da percepção visual de cada indivíduo, a cada momento.

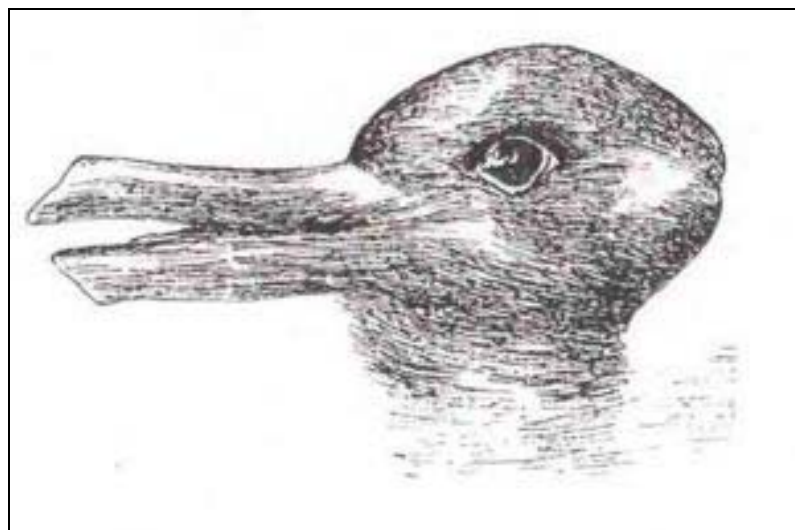


Figura 23 - Imagem “mutável”: apesar de o estímulo visual ser o mesmo, a percepção muda a cada momento, de acordo com cada indivíduo.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/percepcao_visual

Outro exemplo clássico desse tipo de percepção visual, em que há mudança da interpretação dos estímulos, é a figura da jovem moça, que pode ser percebida quando pelo ângulo da esquerda, quase por trás do lado esquerdo da face, ângulo da mandíbula, orelha, ponta dos cílios, ponta do nariz, pescoço e gargantilha vermelha. Ao mesmo tempo, a percepção pode ser de uma velha senhora, cujo perfil esquerdo se pronuncia pelo queixo, boca, olho esquerdo, com um pêlo e uma verruga na curvatura do nariz. Ambas usam um lenço branco sobre a cabeça, um aplique verde no cabelo e vestem casaco de pele marrom (Figura 24).



Figura 24 - Jovem moça ou velha senhora: pode ser percebida tanto uma quanto a outra, dependendo da interpretação dos estímulos visuais por parte de cada indivíduo, a cada momento.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/percepcao_visual

2.1.1.5 Ilusões de Ótica

Nem tudo o que se vê é real. Em determinadas condições a visão capta informações e o cérebro as interpreta de forma diferente do que é na realidade – a ilusão de ótica. Trata-se de demonstrar aqui, somente aspectos gerais que envolvem a ilusão de ótica, diferenciando-a da ilusão visual, esta relativa ao voo, e que será abordada juntamente com a desorientação espacial.

A ilusão de ótica é um fenômeno que se faz presente, independentemente do voo, diferente da ilusão visual, em muitas de suas formas de apresentação. O conflito de percepção da ilusão de ótica diz respeito apenas à imagem, mas não afeta o equilíbrio e, tampouco, a capacidade de orientação.

Um exemplo clássico de ilusão de ótica é o demonstrado abaixo (Figura 25). No exemplo da esquerda, há percepção de um tabuleiro de xadrez com quadrículas claras e cinzas; parece óbvio que as quadrículas A e B são de cores diferentes; no entanto, ao se olhar a mesma figura (direita) com a colocação de duas barras longitudinais na cor cinza, percebe-se que as quadrículas A e B são exatamente da mesma cor.

O cérebro é levado a associar tanto a seqüência lógica das quadrículas, quanto a proximidade e contrastes entre uma e outra. A partir do sombreamento do cilindro verde, fica oculta a cor mais escura da quadrícula B, que somente se revela quando há comparação com as duas barras longitudinais na cor cinza. Tal situação seria impossível de ser aceita sem a comparação das cores das quadrículas A e B entre as duas barras cinzas, o que evidencia, assim, a ilusão de ótica.

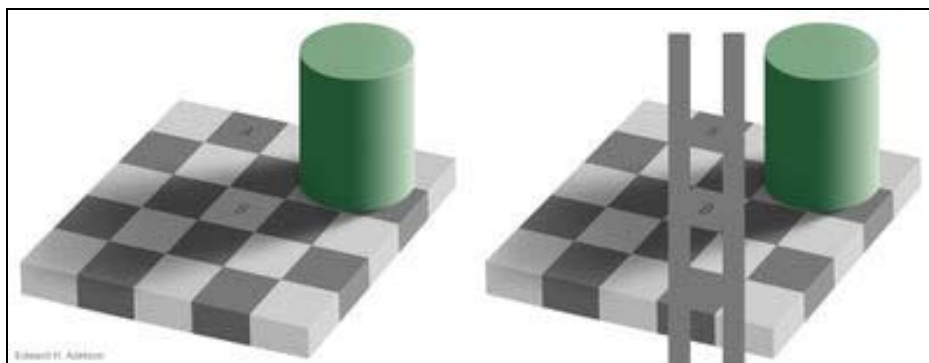


Figura 25 - Tabuleiros de xadrez: ilusão de ótica demonstrando a mesma cor das quadrículas A e B, ainda que pareça impossível aos olhos.
Fonte: <http://ilusaodeotica.com>

Outro exemplo clássico de ilusão de ótica é o desenho com linhas horizontais percebidas como se não fossem paralelas, apesar de serem rigorosamente paralelas (Figura 26). O desencontro vertical no alinhamento das quadrículas coloridas provoca tal interpretação equivocada no cérebro.

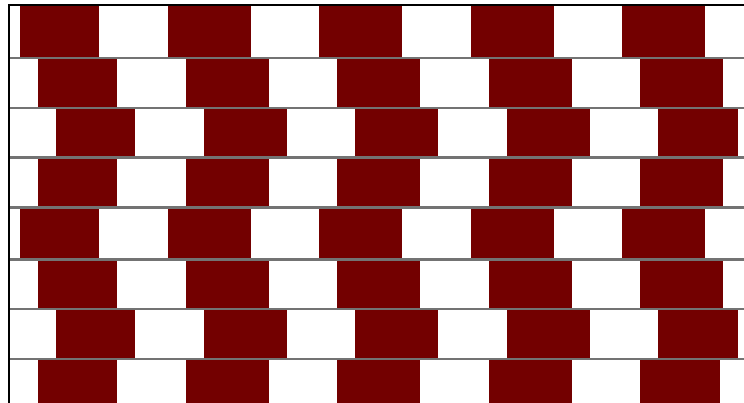


Figura 26 - Linhas horizontais: percebidas como tortuosas e inclinadas, apesar de retas e paralelas.
Fonte: <http://ilusaodeotica.com>

Um terceiro exemplo de ilusão de ótica é a comparação dos dois traços vermelhos verticais, onde se “percebe” que o da direita é maior que o da esquerda, apesar de serem absolutamente iguais (Figura 27).

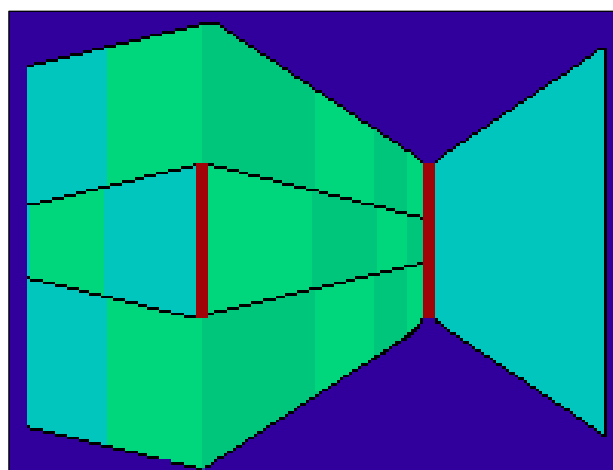


Figura 27 - Linhas vermelhas verticais: percebidas como de tamanhos diferentes (a da direita maior), apesar de serem do mesmo tamanho.
Fonte: <http://ilusaodeotica.com>

Um quarto exemplo de ilusão de ótica é a figura com diversos círculos concêntricos, onde se “percebe” o movimento de giro de diversos deles, apesar de se ter consciência de que se trata de uma ilustração (Figura 28).

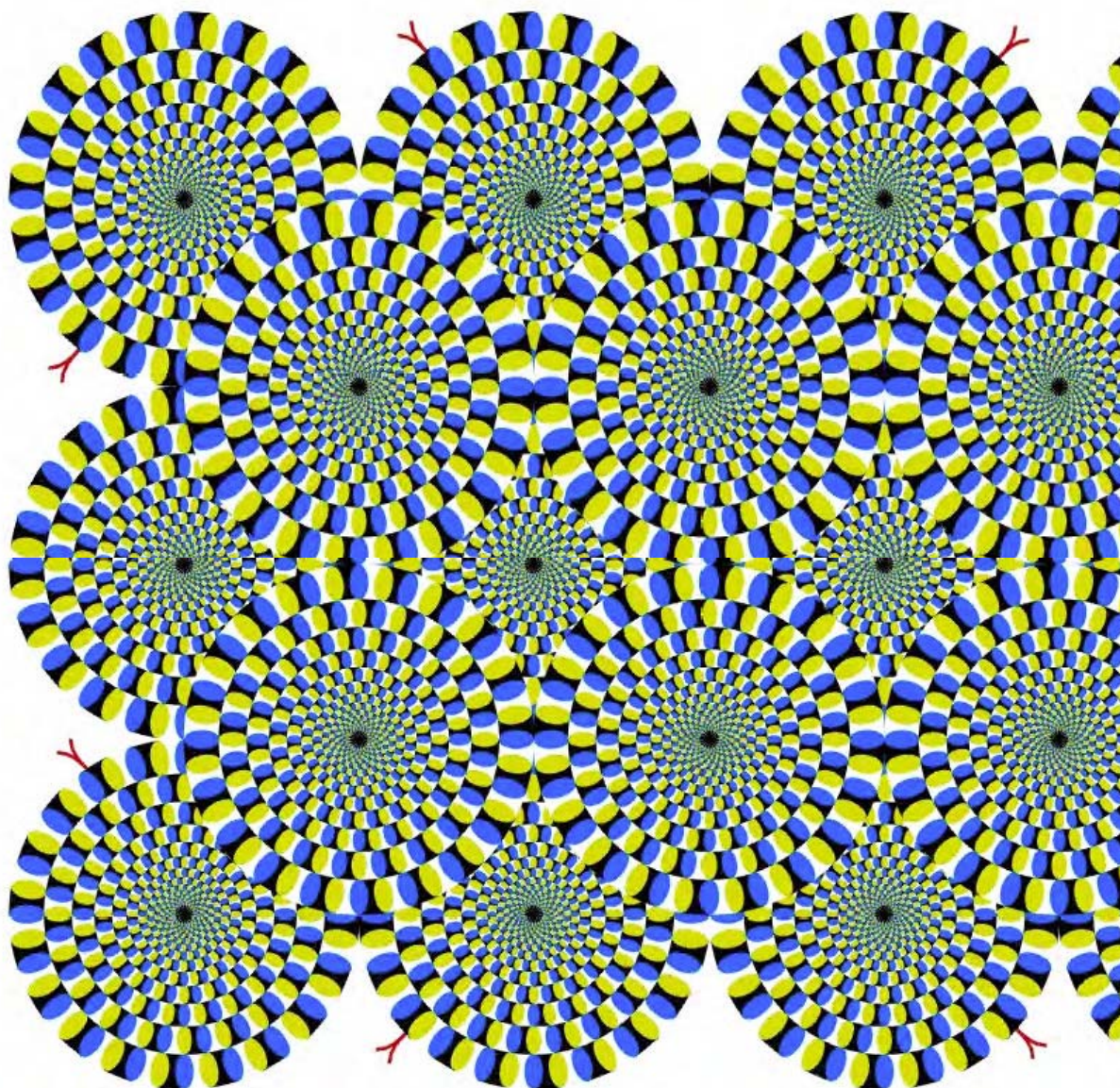


Figura 28 - Círculos girando: apesar de não haver dúvida que o giro dos círculos não é possível, por se tratar de uma ilustração, mesmo assim, percebe-se o movimento.
Fonte: <http://ilusaodeotica.com>

2.1.2. Sensibilidade ao Som e ao Movimento – Órgão Vestíbulo-Coclear

2.1.2.1 Orelha

A sensibilidade ao som e ao movimento depende de estruturas situadas na orelha, que se divide em externa, média e interna (HUNGRIA, 2000) (Figura 29).

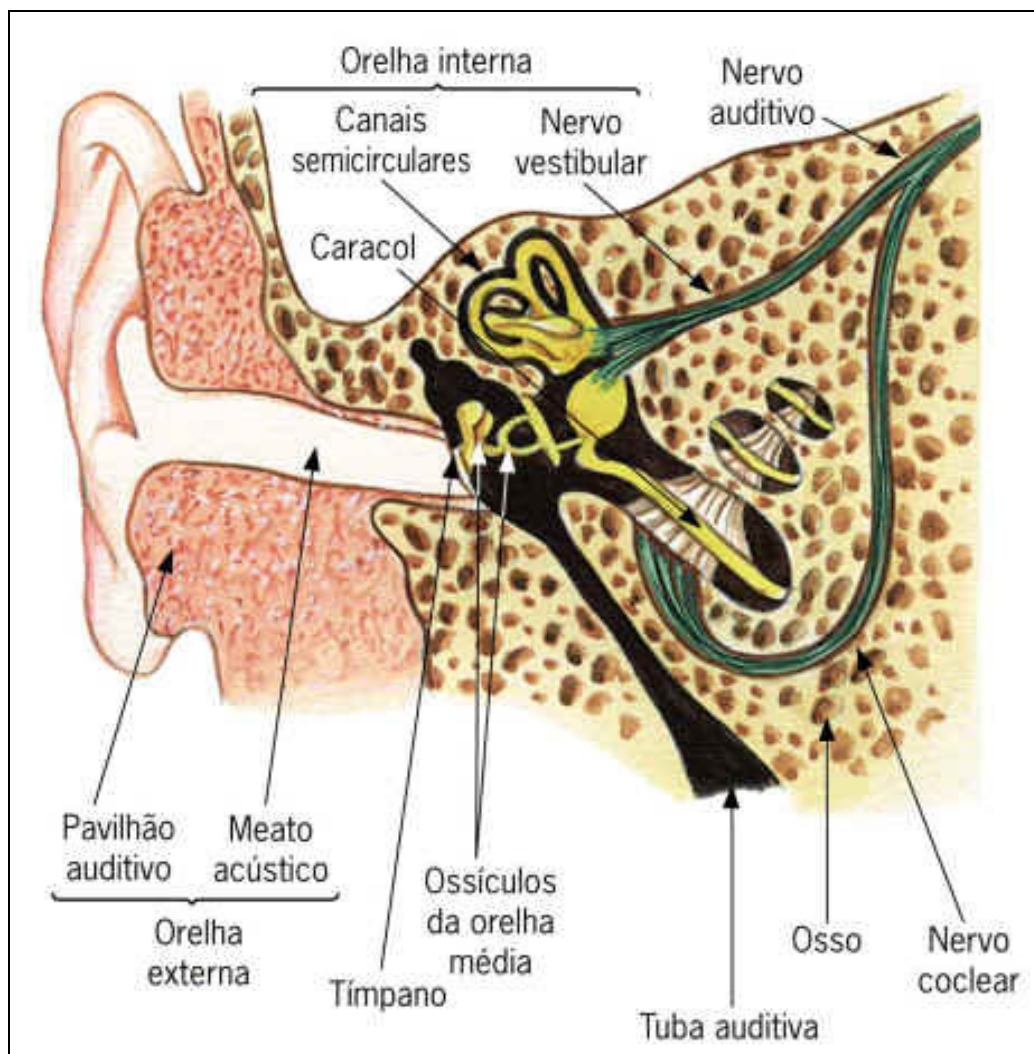


Figura 29 - Anatomia da orelha humana: orelha externa, orelha média e orelha interna.
Fonte: CÉSAR & CEZAR. Biologia. São Paulo, Ed. Saraiva (2002)

2.1.2.1.1 Orelha Externa

A orelha externa está localizada ao lado da cabeça, junto ao osso temporal de cada lado, e é formada pelo pavilhão da orelha e canal auditivo externo, limitado internamente pela membrana timpânica, que mantém contato com o exterior pela sua face externa. O canal auditivo externo tem cerca de três centímetros de comprimento e é revestido internamente por pêlos e glândulas, que fabricam uma substância gordurosa e amarelada, o cerume ou cera. Tanto os pêlos como o cerume protegem a orelha externa das partículas e germes que normalmente existem no ar. O canal auditivo externo termina numa delicada membrana (tímpano ou membrana timpânica) firmemente fixada ao conduto auditivo externo por um anel de tecido fibroso, o anel timpânico (Figura 30). Todo esse conjunto tem como função a captação do som e a condução do mesmo em direção à orelha média (HUNGRIA, 2000).



Figura 30 - Anatomia da orelha externa.
Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos>

2.1.2.1.2 Orelha Média

A orelha média é composta por uma câmara que contém ar e três ossículos – o martelo, a bigorna e o estribo – cuja denominação está de acordo com a forma de cada um, que são articulados entre si e ficam suspensos na câmara timpânica. O cabo do martelo está encostado no tímpano; o estribo apóia-se na janela oval, um dos orifícios dotados de membrana da orelha interna que estabelecem comunicação com a orelha média (Figura 31). O outro orifício é a janela redonda. A cadeia ossicular tem como função transmitir as vibrações sonoras que chegam à membrana timpânica até a orelha interna (janela oval). A orelha média comunica-se também com a faringe, através de um canal denominado tuba auditiva. Esse canal permite que o ar penetre na orelha média. Essa peculiaridade permite a equalização da pressão dos dois lados do tímpano, ou seja, entre o exterior e a orelha interna (HUNGRIA, 2000).

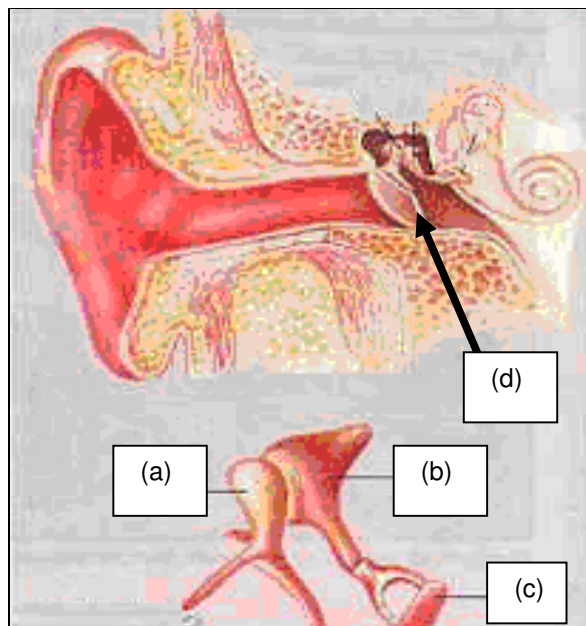


Figura 31 - Anatomia da orelha média e cadeia de ossículos: martelo (a); bigorna (b); estribo (c); membrana timpânica (d).

Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos>

2.1.2.1.3 Orelha Interna

A orelha interna, denominada labirinto, é formada por escavações no osso temporal, revestidas por uma estrutura membranosa e preenchidas por líquido. Estabelece limites com a orelha média pelas janelas oval e a redonda. O labirinto apresenta uma parte anterior (a cóclea ou caracol), que é relacionada com a audição, e uma parte posterior, o aparelho vestibular, que se relaciona com o equilíbrio, sendo constituído pelo vestíbulo e pelos canais semicirculares (Figura 32).

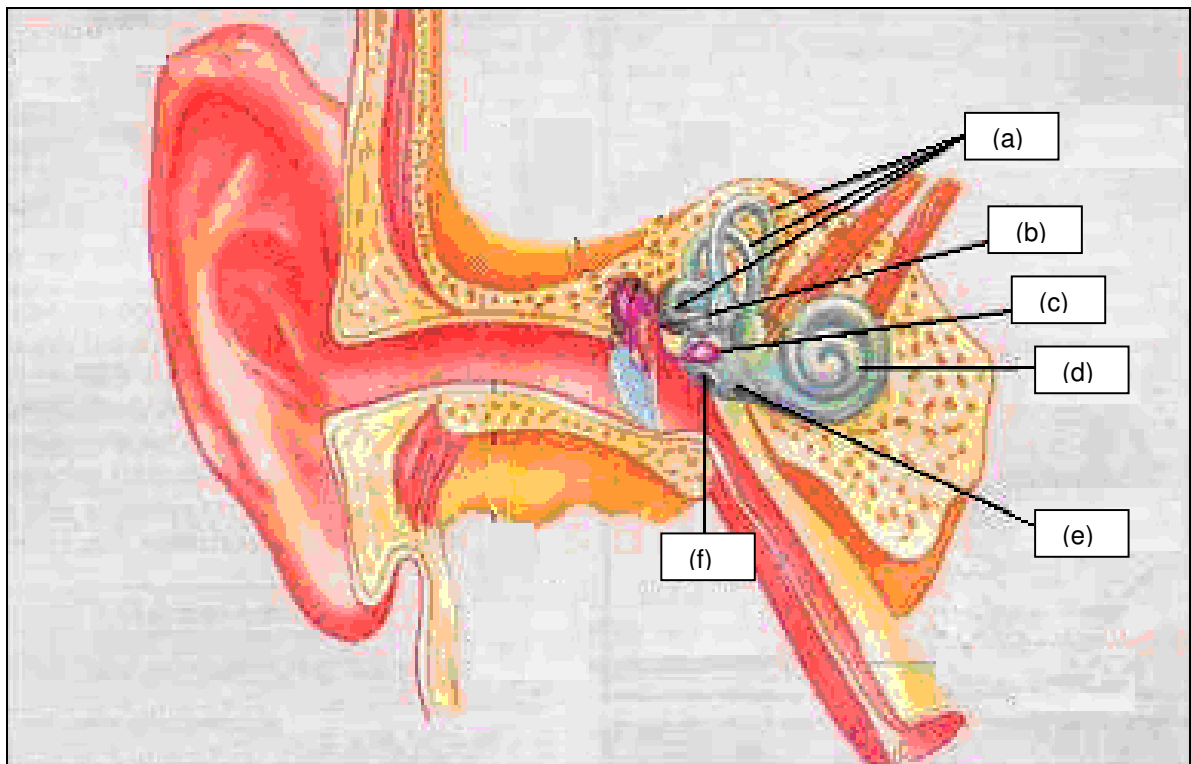


Figura 32 - Anatomia da orelha interna: canais semicirculares (a); sáculo (b); utrículo (c); cóclea (d); janela redonda (e); janela oval (f).

Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos>

2.1.2.1.3.1 Labirinto Anterior – Cóclea

A cóclea é um sistema de três tubos diferentes enrolados, um ao lado do outro, denominados: escala vestibular, escala média e escala timpânica (Figura 33).

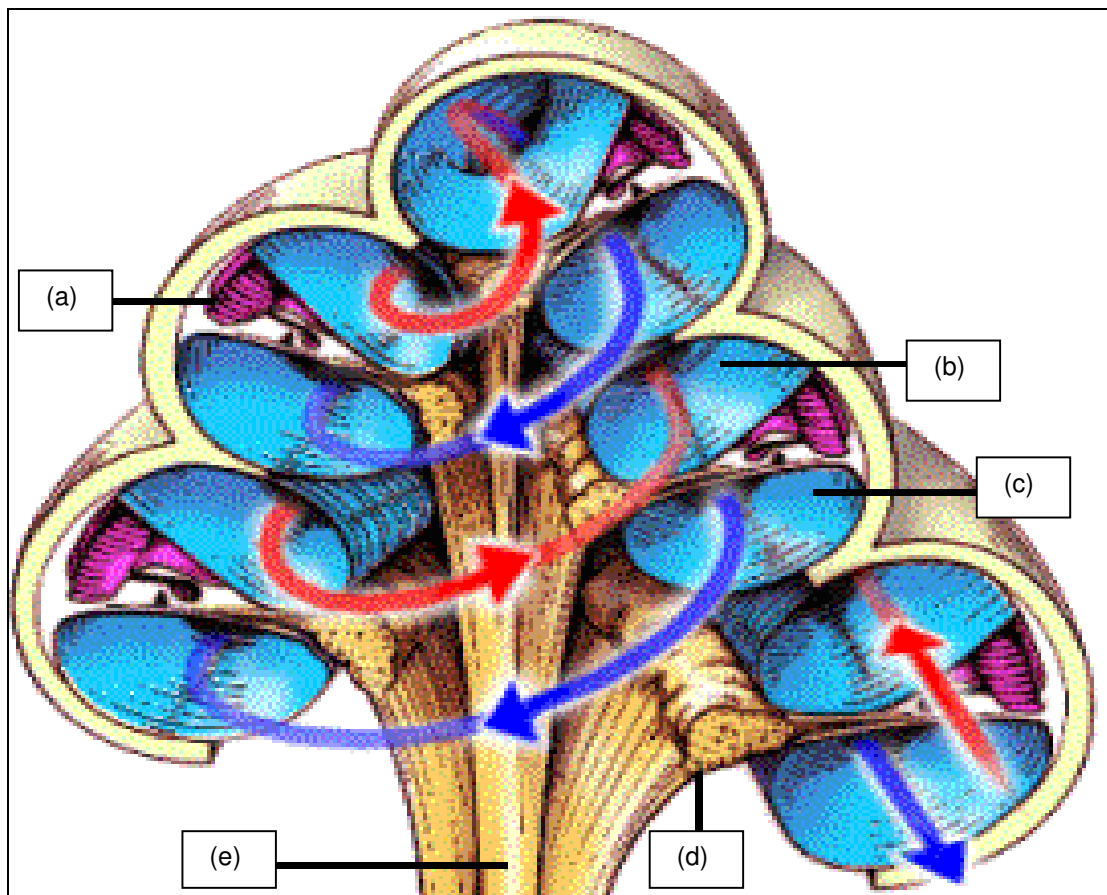


Figura 33 - Anatomia da Cóclea: escala média ou coclear (a); escala vestibular (b); escala timpânica (c); gânglio espiral (d); nervo coclear partindo da membrana basilar (e).
Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos>

A escala vestibular e a escala média são separadas entre si pela membrana de Reissner (também denominada membrana vestibular) e a escala timpânica e a escala média são separadas uma da outra pela membrana basilar. Na superfície da membrana basilar encontra-se uma estrutura – o órgão de Corti – que contém uma série de células sensíveis a estímulos mecânicos, as células ciliares (Figura 34).

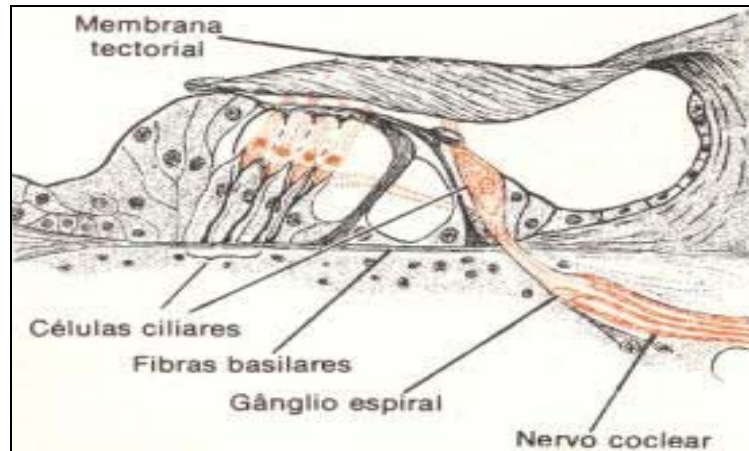


Figura 34 - Estrutura do Órgão de Corti: células ciliares, gânglio espiral e nervo coclear.

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 585

Estas células constituem os órgãos receptores que geram impulsos nervosos em resposta às vibrações sonoras. As vibrações sonoras penetram na escala vestibular pela base do estribo ao nível da janela oval. A base cobre essa janela e está conectada às bordas da mesma por um ligamento frouxo, de modo que pode se mover para dentro e para fora, de acordo com as vibrações sonoras (OLIVEIRA, 1994). O movimento para dentro faz com que o líquido se mova no sentido das escalas vestibular e média, o que imediatamente aumenta a pressão em toda a cóclea, causando protrusão da janela redonda para fora (Figura 35).

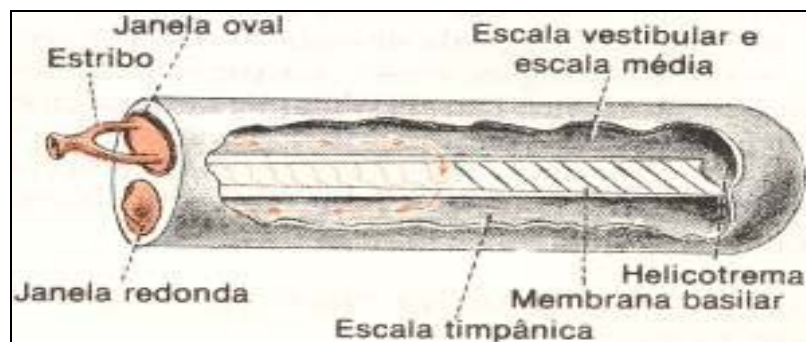


Figura 35 - Escalas: vestibular, média e timpânica, demonstrando o movimento do líquido a partir das vibrações que chegam pelo estribo.

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 584

A habilidade de localização da fonte sonora atua como importante elemento para o sistema de orientação humano. Uma pessoa determina a direção da qual procede um som graças a dois mecanismos principais: pela diferença de tempo entre a entrada do som numa e noutra orelha e pela diferença entre as intensidades de som em ambas as orelhas.

O primeiro mecanismo funciona melhor para freqüências inferiores a 3.000 ciclos por segundo; o mecanismo de intensidade opera melhor para freqüências mais altas, pois a cabeça atua como uma barreira para sons dessa freqüência. O mecanismo baseado na diferença de tempo permite uma discriminação muito mais exata na direção do que o mecanismo da intensidade, pois o mecanismo do retardo não depende de fatores extrínsecos, mas apenas do intervalo exato de tempo entre os dois sinais acústicos.

Assim, se uma pessoa está olhando para o lugar de onde vem o som, este alcançará as duas orelhas ao mesmo tempo; se, no entanto, o lado direito estiver mais próximo à fonte sonora do que o esquerdo, os sinais sonoros serão percebidos primeiro pela orelha direita (MANGABEIRA ALBERNAZ, 2000).

Acredita-se que o mecanismo desse processo de reconhecimento de que direção vem o som origina-se nos núcleos olivares superiores, que divide-se em duas partes, o núcleo olivar superior medial e o núcleo olivar superior lateral. Este está relacionado à detecção da direção de onde está vindo o som pelo mecanismo da intensidade; o medial, relacionado à detecção o intervalo de tempo entre os sinais acústicos que chegam às duas cócleas (MANGABEIRA ALBERNAZ, 2000).

Assim, tanto a partir da intensidade quanto a partir do intervalo de tempo dos sinais sonoros, se estabelece um padrão de estimulação dos dendritos dos neurônios dos núcleos olivares. A transmissão do estímulo do órgão de Corti para o córtex cerebral é um mecanismo complexo e constitui a via auditiva (MACHADO, 1981).

Via auditiva

Os receptores da audição estão no órgão espiral de Corti situado na cóclea de cada orelha interna.

Os neurônios I se localizam no espiral situado na cóclea, sendo que são neurônios bipolares, cujos prolongamentos periféricos são pequenos e terminam em contato com os receptores no órgão de Corti.

Os prolongamentos centrais constituem a porção coclear do nervo vestibulo-coclear e terminam na ponte, estabelecendo sinapse com os neurônios II. Estes estão situados nos núcleos cocleares dorsal e ventral, cujos axônios cruzam para o lado oposto constituindo o corpo trapezóide, contornam o núcleo olivar superior e inflectem cranialmente, para formar o lemnisco lateral do lado oposto. As fibras do lemnisco lateral terminam fazendo sinapse com os neurônios III.

A maioria dos neurônios III está localizada no colículo inferior e dirige-se ao corpo geniculado medial, onde estão localizados os neurônios IV. Estes, a partir de seus axônios, a radiação auditiva, que, passando pela cápsula interna, chega à área auditiva do córtex (área 41 de Brodmann), no giro temporal-transverso anterior (Figura 36) (MACHADO, 1981).

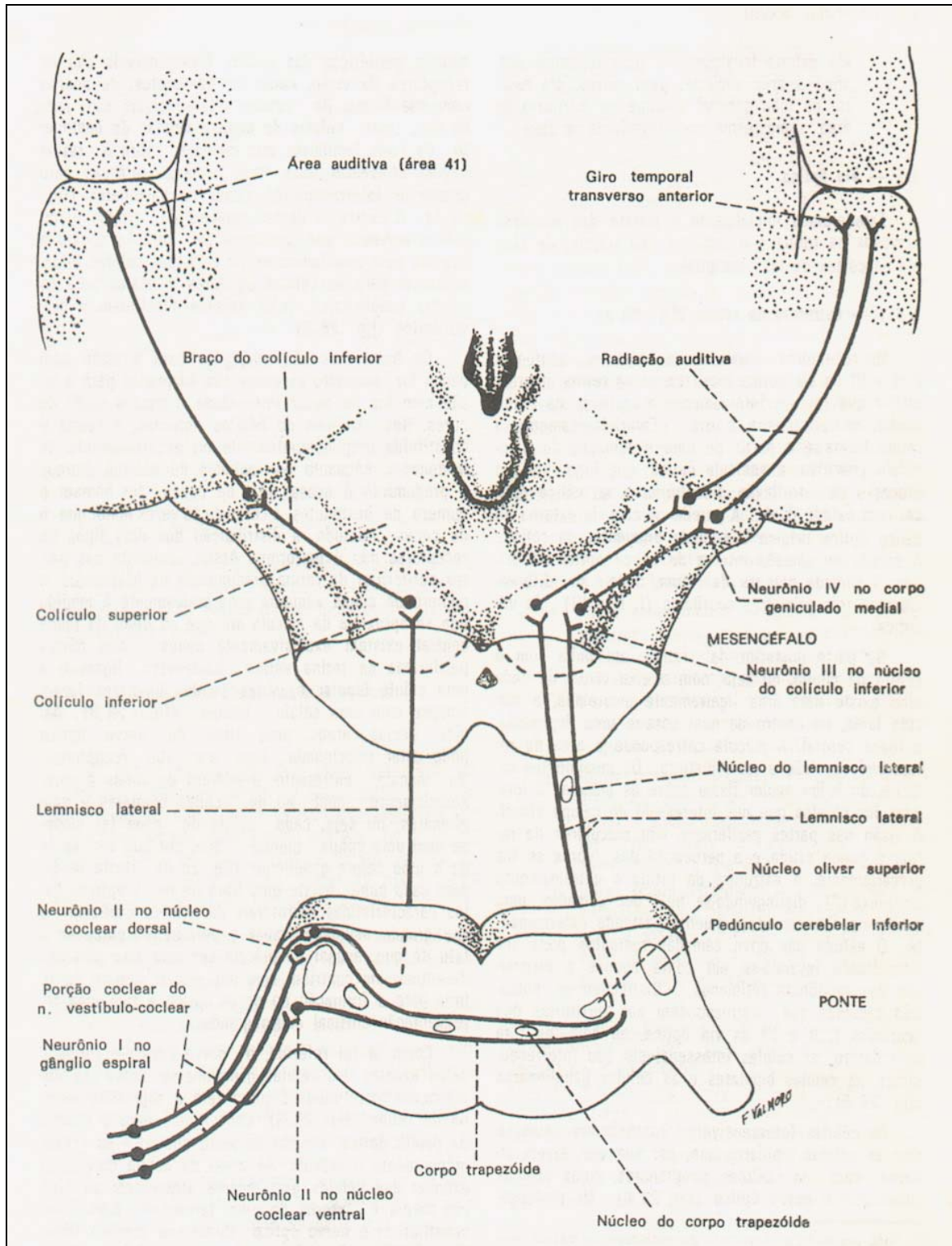


Figura 36 - Via Auditiva: caminho percorrido pelo estímulo desde os neurônios I, II, III e IV até a Área Auditiva no córtex cerebral (Área 41).

Fonte: MACHADO, A. Neuroanatomia Funcional. 1ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Atheneu, 1981. p. 245

Apesar de bastante complexa a via auditiva mantém uma organização tonotópica – impulsos nervosos relacionados com tons de determinadas frequências seguem caminhos específicos ao longo de toda a via – projetando-se em partes específicas da área 41 de Broadmann.

A via auditiva apresenta duas peculiaridades: (a) possui um grande número de fibras homolaterais de forma que o córtex cerebral recebe impulsos auditivos originados na cóclea do seu próprio lado; (b) possui um grande número de núcleos reles, o que faz com que haja, ao longo da via, quatro ou mais neurônios, enquanto nas demais vias o número é geralmente três. Assim, a audição pode ser resumida como vibrações mecânicas que se transformam em ondas de pressão hidráulica que se propagam pela endolinfa e movem as células ciliares do órgão de Corti, gerando um potencial de ação que é transmitido aos centros auditivos do tronco encefálico e do córtex cerebral (MACHADO, 1981).

2.1.2.1.3.2 Labirinto Posterior – Sistema Vestibular

O labirinto posterior ou aparelho vestibular é o órgão sensorial que detecta as sensações relacionadas com a posição da cabeça no espaço, isto é, determina se ela está ereta com relação à força gravitacional da Terra, se está jogada para trás, se está voltada para baixo, ou em outra posição, o que dá o equilíbrio. Este sistema detecta também as mudanças bruscas de movimento (Figura 37), a partir da detecção de aceleração, que pode ser de dois tipos: linear ou angular.

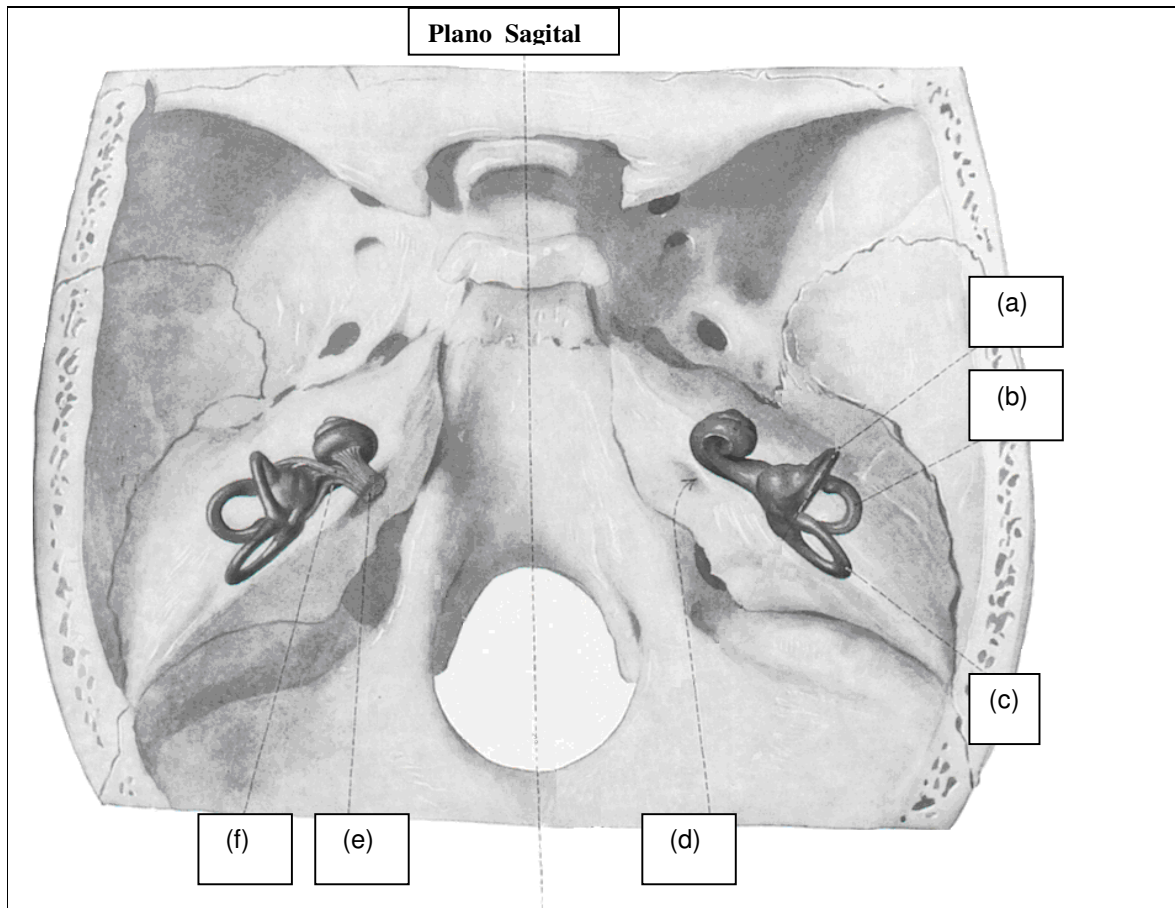


Figura 37 - Topografia do Labirinto Posterior – Sistema Vestibular: canal semicircular vertical anterior (a); canal semicircular horizontal ou lateral (b); canal semicircular vertical posterior (c); forame acústico interno (d); nervo vestibulo-coclear (e); par vestibular (f).

Fonte: SOBOTTA/BECHER. Atlas de Anatomia Humana. Tomo III. 17ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Koogan, 1977. p. 162.

O sistema vestibular é composto por um labirinto ósseo contendo um labirinto membranoso, constituindo a parte funcional do aparelho. O labirinto ósseo consiste de osso duro, mais denso que as paredes circunvizinhas da porção petrosa do osso temporal. Há um revestimento, o periósteo, que contém um líquido claro, a perilinfa. A parte membranosa, que contém um líquido denominado endolinfa, é composta pelos canais semicirculares e por duas câmaras conhecidas como utrículo e sáculo (Figura 38).

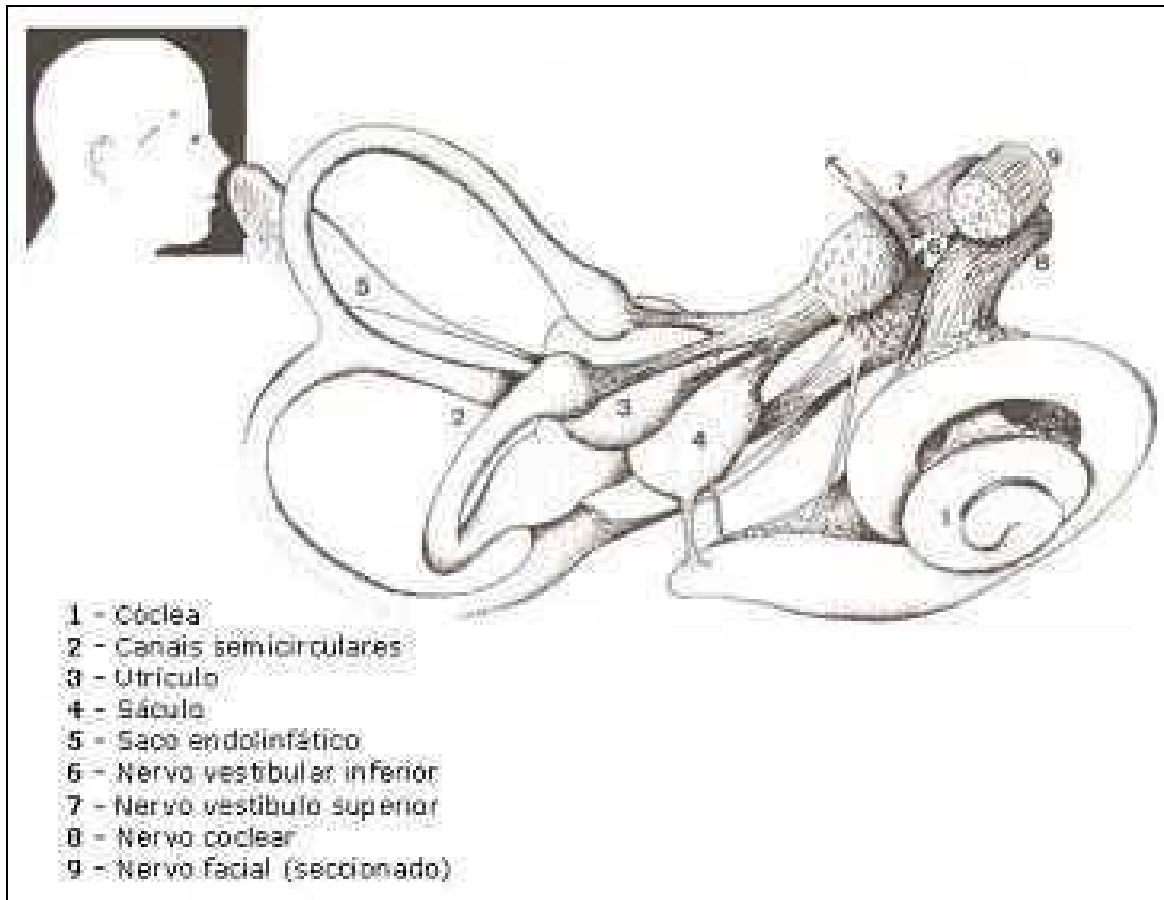


Figura 38 - Labirinto Posterior – Sistema Vestibular: anatomia com seus diversos componentes da parte membranosa.

Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos/Sentidos3.asp>

Anatomia e Fisiologia do Sistema Vestibular

Há uma estrutura para detectar a orientação da cabeça em relação à gravidade – a mácula – órgão sensorial do utrículo e do sáculo que exerce essa função. Localizada na superfície interna de cada utrículo e sáculo, a mácula possui pouco mais de 2 mm de diâmetro. No utrículo, situa-se no plano horizontal e tem papel importante na orientação normal da cabeça relativa à direção da força gravitacional ou aceleratória linear. A mácula do sáculo situa-se no plano vertical, exercendo importante função para detectar movimentos quando a cabeça não está numa posição vertical. Cada mácula é coberta por camada gelatinosa na qual estão incrustados muitos pequenos cristais de

carbonato de cálcio, denominados otólitos. Também há na mácula milhares de células ciliadas, que projetam cílios até a camada gelatinosa. As bases e lados das células ciliadas fazem sinapse com axônios sensoriais do nervo vestibular (OLIVEIRA, 1994) (Figura 39).

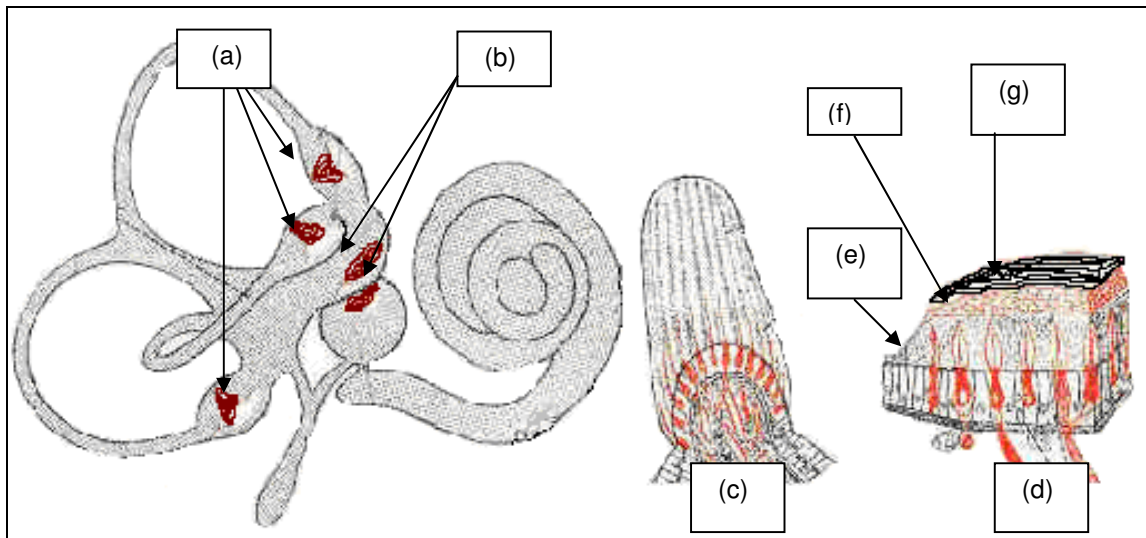


Figura 39 - Anatomia do aparelho vestibular com seus diversos componentes funcionais: cristas ampulares (a); máculas (b); vista aumentada da crista ampular (c); vista aumentada da mácula (d); tufo ciliar (e); camada gelatinosa (f); cristais de carbonato de cálcio – otólitos (g).

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana (1989. p. 495)

Mesmo em condições de repouso, muitas fibras nervosas que saem das células ciliadas transmitem uma série contínua de impulsos nervosos, em média cerca de 200 por segundo. A inclinação dos cílios de uma célula ciliada para um lado faz com que o tráfego de impulsos em suas fibras nervosas aumente acentuadamente; a inclinação dos cílios para o lado oposto reduz o tráfego de impulsos nervosos, muitas vezes fazendo cessá-lo por completo. Por isso, quando a inclinação da cabeça se altera e o peso dos otólitos (três vezes maior que o dos tecidos circundantes) força a inclinação dos cílios, sinais apropriados são transmitidos ao cérebro para controlar o equilíbrio (OLIVEIRA, 1994).

Em cada mácula, as diferentes células ciliadas se orientam em direções diferentes, de modo que algumas delas são estimuladas quando a cabeça se inclina para frente, algumas outras quando ela se inclina para trás, outras quando ela se inclina

para um lado e assim por diante. Devido a isso, ocorre um padrão diferente de excitação na mácula para cada posição da cabeça. É esse padrão que informa ao cérebro a respeito da orientação da cabeça (OLIVEIRA, 1994).

Os três canais semicirculares em cada aparelho vestibular, conhecidos, respectivamente, como os canais semicirculares anterior, posterior e horizontal, são dispostos em ângulo reto entre si, de modo que representam todos os três planos no espaço. Quando a cabeça está inclinada para frente por cerca de 30°, os dois canais semicirculares horizontais estão em localização aproximadamente horizontal no que diz respeito à superfície da Terra. Os canais anteriores estão, então, localizados em planos verticais que se projetam para frente e 45° para fora, e os canais semicirculares posteriores também estão em planos verticais, mas projetam-se para trás e 45° para fora. Cada canal tem uma dilatação em uma de suas extremidades, denominada ampola, e os canais estão repletos de um líquido denominado endolinfa. Há uma pequena crista em cada ampola denominada crista ampular, e, na porção superior da crista, há uma substância gelatinosa semelhante àquela do utrículo, que é conhecida como cúpula. No interior da cúpula projetam-se os cílios das células ciliadas localizadas ao longo da crista ampular, e estas células, por sua vez, estão conectadas às fibras nervosas sensoriais que se destinam ao nervo vestibular (GUYTON, 1989).

A inclinação da cúpula para um lado, determinada pelo fluxo de líquido nos canais, estimula as células ciliadas, enquanto a inclinação oposta as inibe. A célula ciliada na mácula ou numa cúpula tem em média cerca de 50 pequenos cílios, os estereocílios, além de um cílio muito grande, chamado de cinocílio (Figura 40). Este está localizado em um dos lados da célula ciliada, sempre do mesmo lado da célula relativamente à sua orientação na crista ampular. Quando os estereocílios estão inclinados para o lado do cinocílio há estimulação (despolarização); ao contrário, quando inclinados para o lado oposto ao cinocílio, há inibição (hiperpolarização) (GUYTON, 1989).

Ao se voltar subitamente a cabeça em qualquer direção, o líquido presente nos canais semicirculares se desloca para trás num canal e para frente no homólogo do outro lado, em consequência de sua inércia. Com o movimento do fluido dos canais semicirculares ocorre um fluxo contra a crista ampular, cujos cílios se deslocam de um

lado para o outro, dando a ele a sensação de giro da cabeça. O sentido do movimento se dá por um aumento ou diminuição da frequência da descarga das fibras do nervo vestibular. Se as fibras vestibulares aferentes de um lado são ativadas, as fibras homólogas situadas do outro lado são inibidas, o que dá a noção exata do sentido da rotação. (OLIVEIRA, 1994).

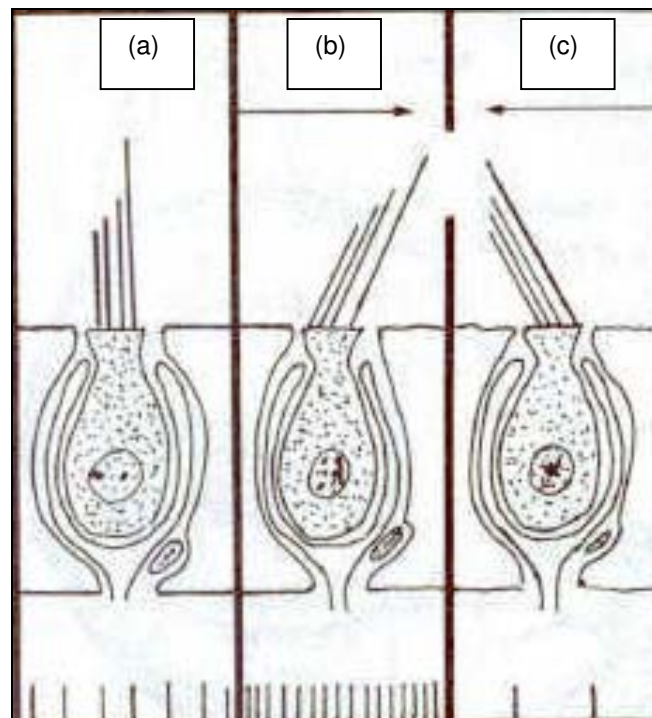


Figura 40 - Célula ciliar vista em detalhe: repouso (a); excitação (b); inibição (c).

Fonte: <http://www.forl.org.br>

Da mesma forma, por exemplo, um piloto dentro de uma aeronave sofre acelerações no sistema vestibular de acordo com a movimentação da aeronave nos diferentes eixos (X, Y ou Z). As resultantes das acelerações em cada eixo são detectadas por um par específico de canais semicirculares (Figura 41).

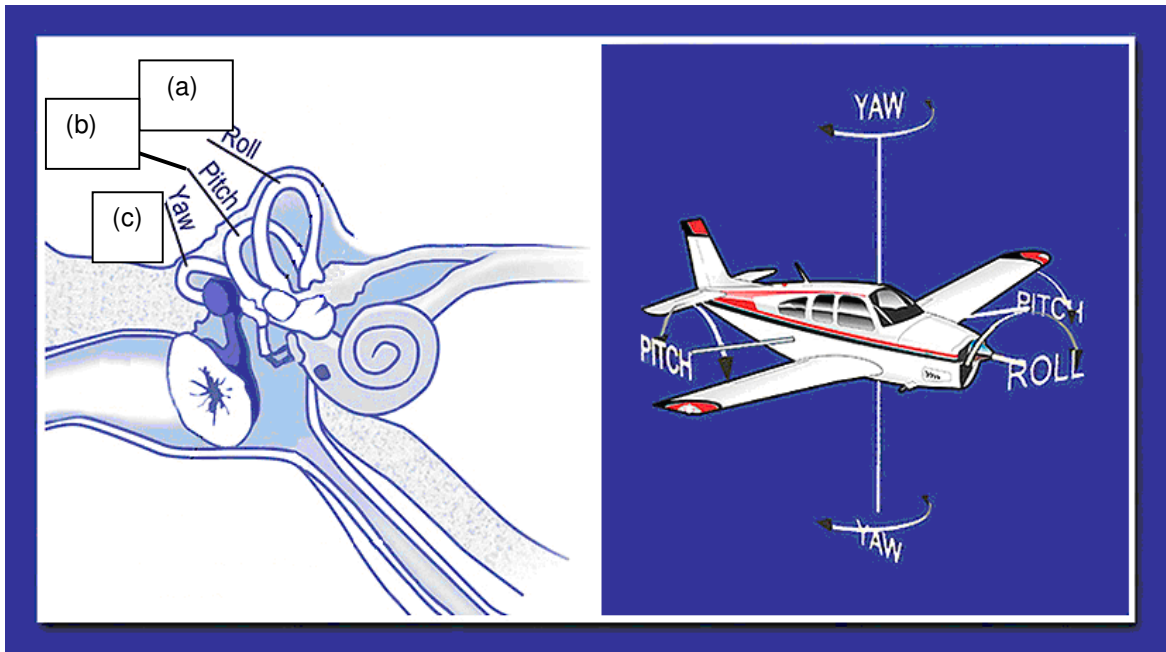


Figura 41 - Correlação dos canais semicirculares com os eixos de movimento de rotação numa aeronave (asa fixa) e respectivos comandos: canal semicircular posterior, detecta aceleração angular em torno do eixo X, movimento de rolamento, do inglês, *ROLL*, comandado pelos ailerons (manche para a direita ou para a esquerda) (a); canal semicircular anterior, detecta aceleração angular em torno do eixo Y, movimento de arfagem, do inglês, *PITCH*, comandado pelo profundor (manche para frente ou para trás) (b); canal semicircular lateral, detecta aceleração angular em torno do eixo Z, movimento de guinada, do inglês, *YAW*, comandado pelo leme (pedais) (c).

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety>

Os estímulos são captados pelas cristas ampulares e a informação transmitida dos canais semicirculares até o sistema nervoso, avisando sobre súbitas mudanças na direção do movimento (Figura 42).

Desta forma, ao girarmos a cabeça para um lado e para outro, diferentes padrões de impulsos são gerados; da mesma maneira, há um padrão de impulso ao permanecermos com a cabeça em posição neutra, ou seja, sem movimento.

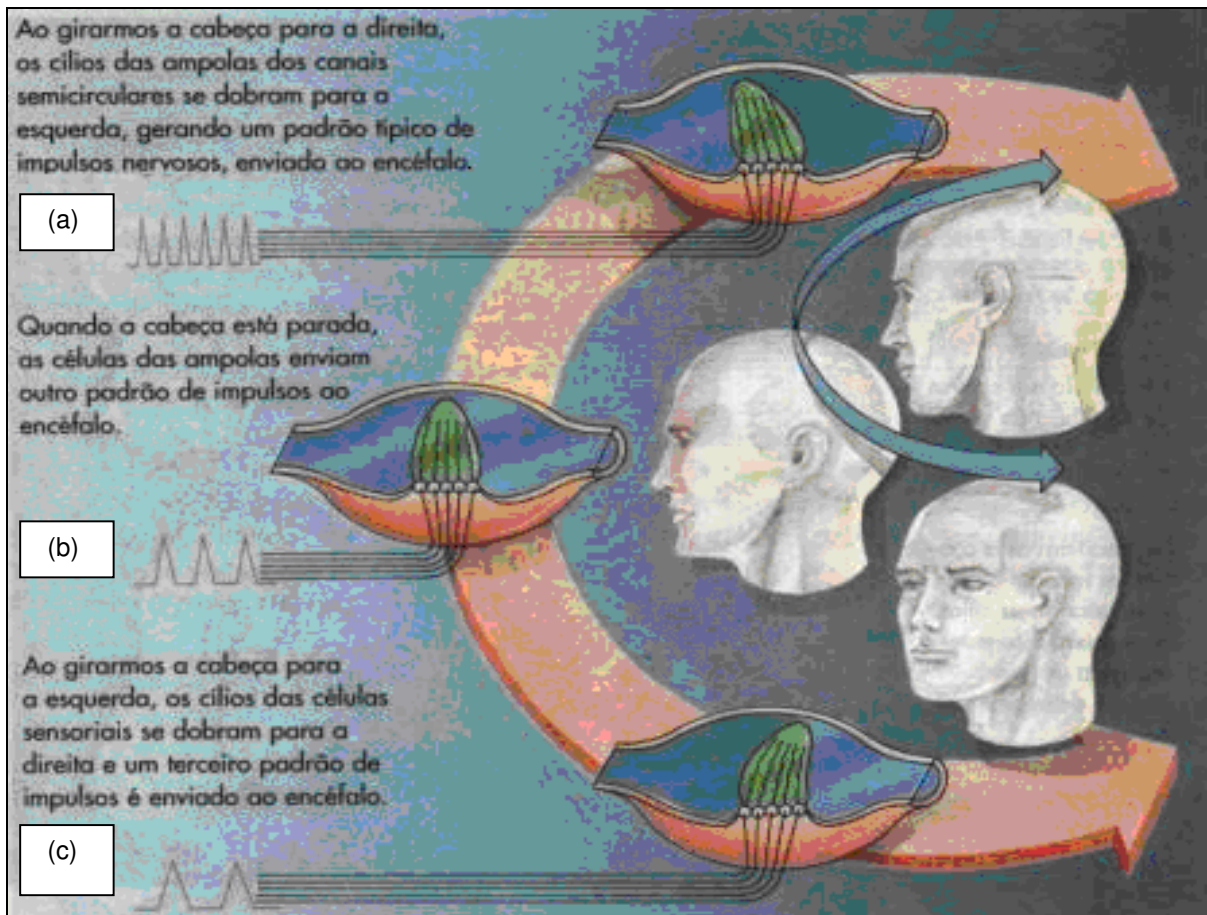


Figura 42 - Correlação dos movimentos realizados com a cabeça e atuação dos canais semicirculares: tomando-se como exemplo o canal semicircular lateral direito, mediante aceleração angular para a direita (giro de cabeça para a direita), há inclinação dos estereocílios que se deslocam, pela inércia da endolinfa, em direção ao cinocílio, o que provoca a despolarização (ativação) (a); quando a cabeça está parada, sem movimento, a descarga é de repouso (b); mediante aceleração angular para a esquerda (giro de cabeça para a esquerda), os estereocílios se movem em direção contrária ao cinocílio, o que provoca hiperpolarização (inibição) (c).

Fonte: <http://www.afh.bio.br/sentidos>

Conexões Nervosas do Sistema Vestibular com o SNC

A maioria das fibras do nervo vestibular termina nos núcleos vestibulares, que estão localizados na junção do bulbo com a ponte, mas algumas fibras passam para os núcleos fastigiais, úvula, e lobos floculonodulares do cerebelo sem realizar sinapse. As fibras que terminam nos núcleos vestibulares fazem sinapse com um neurônio de segunda ordem que também envia fibras para estas áreas do cerebelo, bem como para

o córtex de outras porções do cerebelo, para o feixe vestibuloespinal, para o fascículo longitudinal medial e para as outras áreas do tronco cerebral, em particular, a formação reticular (MACHADO, 1981).

Há que se observar, portanto, a íntima associação entre o aparelho vestibular, os núcleos vestibulares e o cerebelo (Figura 43).

A via primária para os reflexos de equilíbrio começa nos nervos vestibulares e passam a seguir para ambos os núcleos vestibulares e o cerebelo. Então, após o tráfego de impulsos entre essas duas vias, os sinais são enviados aos núcleos vestibulares do tronco cerebral, assim como inferiormente para a medula espinal através dos feixes vestibuloespinal e reticuloespinal. Por outro lado, os sinais para a medula controlam a atuação recíproca entre a facilitação e inibição dos músculos extensores, controlando, assim, automaticamente, o equilíbrio.

Os núcleos vestibulares de cada lado do tronco cerebral são divididos em quatro subdivisões distintas:

a) Núcleo vestibular superior e núcleo vestibular medial: recebem sinais principalmente dos canais semicirculares e enviam, por sua vez, grande número de sinais nervosos ao fascículo longitudinal medial para ocasionar movimentos corretivos dos olhos, bem como sinais ao feixe vestibuloespinal medial para ocasionar movimentos apropriados da cabeça e do pescoço;

b) Núcleo vestibular lateral: recebe sua inervação primariamente do utrículo e, possivelmente, do sáculo; transmite, por sua vez, sinais eferentes para a medula espinal pelo feixe vestibuloespinal lateral, para controlar os movimentos corporais;

c) Núcleo vestibular inferior: recebe sinais tanto dos canais semicirculares como do utrículo e envia tanto ao cerebelo como à formação reticular do tronco cerebral.

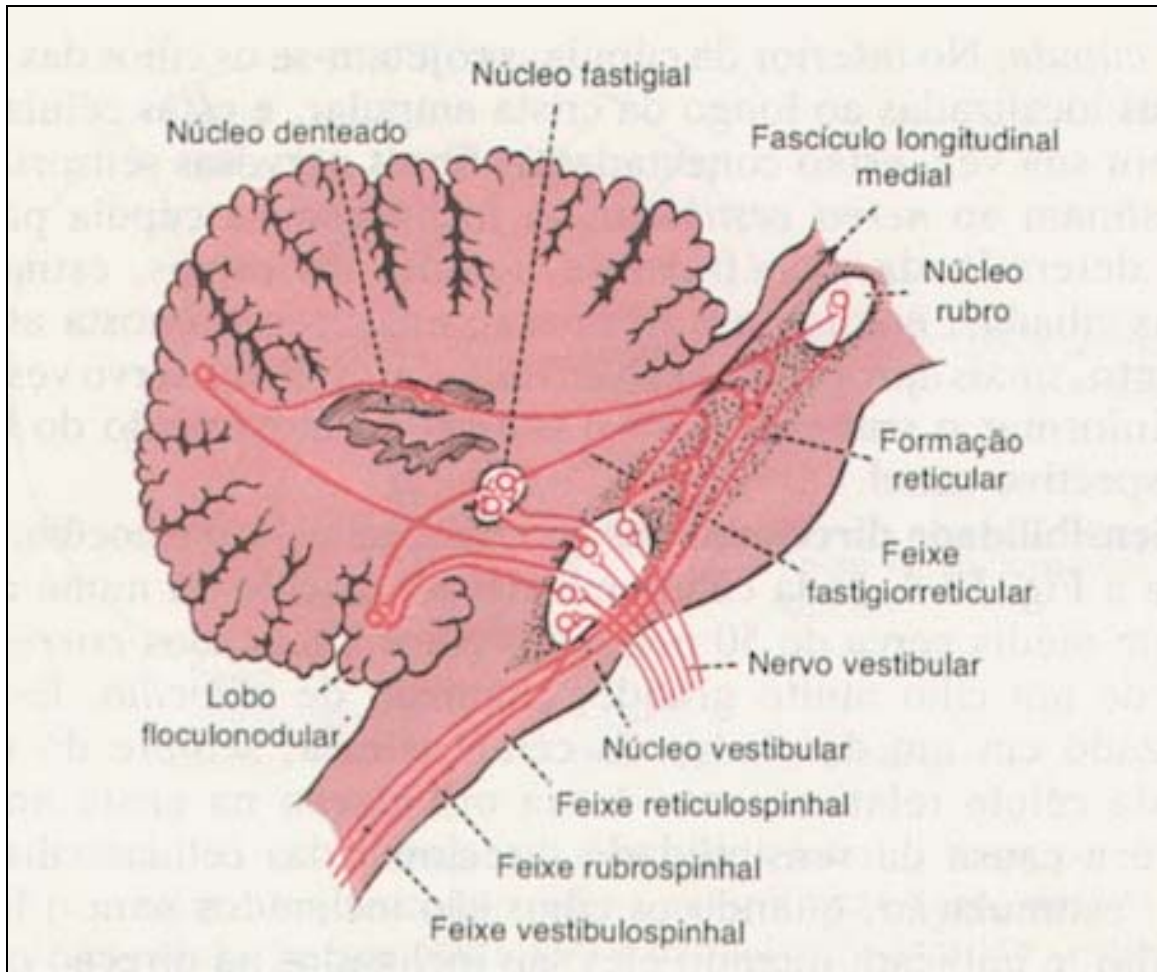


Figura 43 - Cerebelo e conexões integradas com a formação reticular.

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 496

De posse de todas essas informações, a formação reticular (da porção inferior do tronco cerebral) pode corrigir qualquer tendência de desequilíbrio, antes mesmo que ocorra. Isso é particularmente importante quando se muda rapidamente a direção de um movimento (GUYTON, 1989) (Figura 44). Os sinais transmitidos para cima, no tronco cerebral, oriundos dos núcleos vestibulares e do cerebelo, via fascículo longitudinal medial, determinam movimentos corretivos dos olhos cada vez que a cabeça gira, de forma que os olhos podem permanecer fixos num objeto visual específico (MACHADO, 1981).

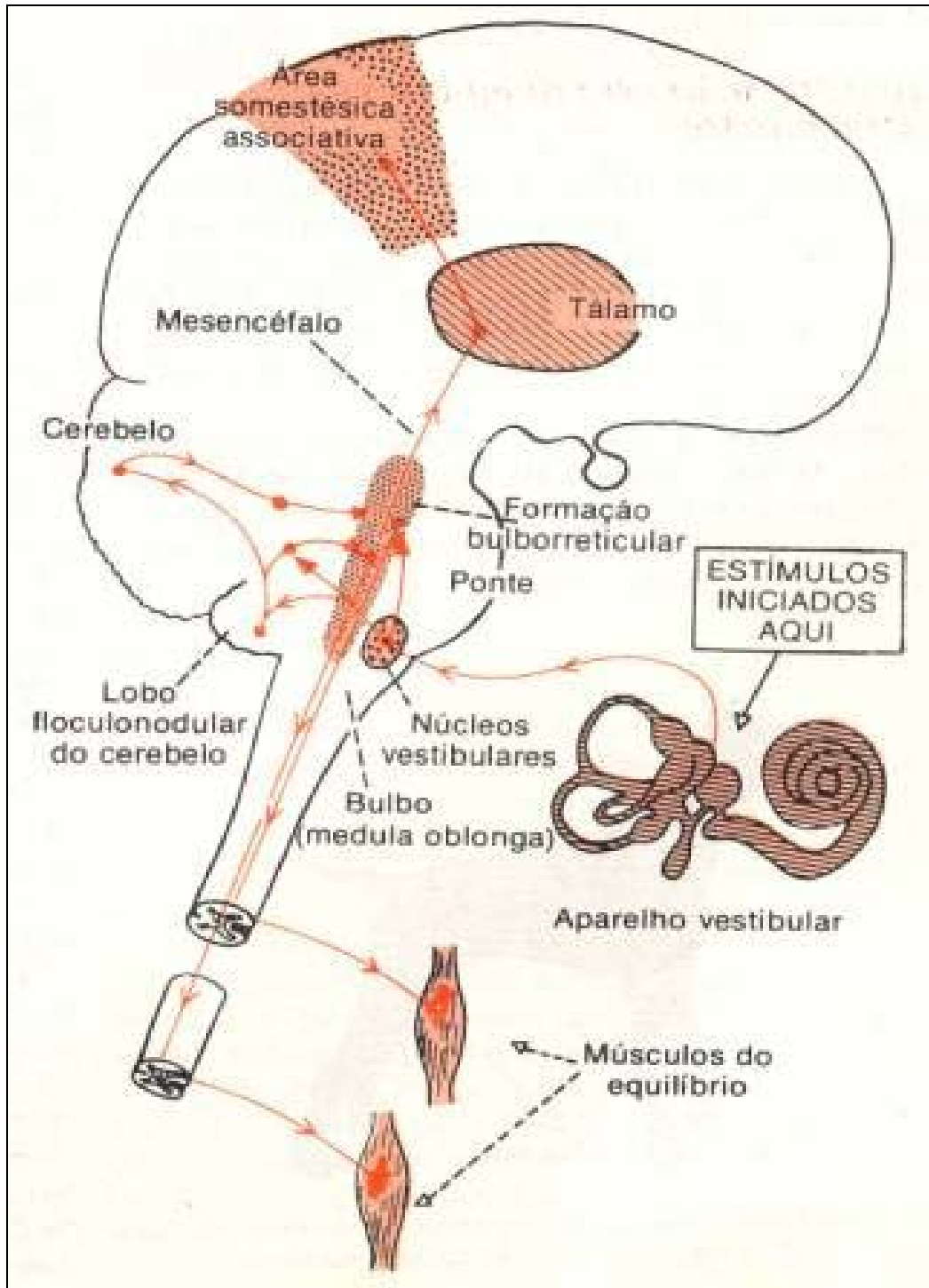


Figura 44 - Integração das informações relativas aos movimentos: atuação da formação reticular, que reúne impulsos oriundos do sistema vestibular, dos fusos musculares (sistema proprioceptivo) e do cerebelo, o que permite uma rápida correção no equilíbrio.

Fonte: GUYTON, A.C. Fisiologia Humana. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 498

2.1.3 Sistema Proprioceptivo

Segundo Sherrington, do ponto de vista fisiológico, os receptores que compõem o sistema proprioceptivo são de três tipos: exteroceptores (localizam-se na pele, superfície externa do corpo), proprioceptores (localizam-se profundamente nos músculos, tendões, fâcias, ligamentos e cápsulas articulares) e interoceptores (também denominados viscerceptores, localizam-se nas vísceras e nos vasos, dando origem às diversas sensações viscerais como a fome, sede, dor visceral), que fornecem informações a respeito do teor de oxigênio, pressão osmótica do sangue, pressão arterial, dentre outras informações não-somáticas (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Os impulsos nervosos oriundos dos proprioceptores podem conscientes ou inconscientes, sendo que os primeiros atingem o córtex cerebral, permitindo a percepção de posição do corpo e de suas partes, bem como a atividade muscular e do movimento das articulações. São, pois, responsáveis pelos sentidos de posição e de movimento (cinestesia). Já os impulsos proprioceptivos inconscientes não despertam qualquer sensação, sendo utilizados pelo organismo para a regulação reflexa da atividade muscular através do reflexo miotático, ou da atividade do cerebelo (MACHADO, 1981).

Usualmente a propriocepção é abordada por alguns autores como “não vestibular” em comparação aos estímulos proprioceptivos vestibulares, que correspondem ao sistema vestibular propriamente dito. Diferente deste, o sistema proprioceptivo tem origem nas estruturas fusiformes localizadas nos músculos, nos tendões, nos receptores das articulações, na pele e nas vísceras (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

As estruturas localizadas na musculatura esquelética, nos tendões e nas articulações constituem os proprioceptores e dividem-se, respectivamente, em:

- a) Fusos musculares;
- b) Órgãos tendíneos de Golgi;
- c) Terminações livres, Corpúsculos lamelares de Pacini e Terminações de Rufini.

Na pele, são chamadas de exteroceptores, que se dividem em:

- a) mecanorreceptores: respondem ao toque e à pressão;
- b) termorreceptores: respondem ao calor e ao frio;
- c) nociceptores: respondem aos estímulos nocivos de origem mecânica e/ou térmica, originando a sensação de dor.

Do ponto de vista de receptores cutâneos, apenas os mecanorreceptores contribuem significativamente para a orientação espacial (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Desta forma, as informações provenientes das diversas estruturas localizadas em diferentes regiões do corpo, a partir de diferentes estímulos, são captadas de forma a tornar possível ao ser humano localizar uma parte de seu corpo no espaço e identificar em que posição está, por exemplo, reconhecendo se está sentado ou em pé (Figura 45). Esta função de localização do todo ou parte do corpo em relação ao espaço refere-se aos estímulos somáticos (oriundos dos exteroceptores e proprioceptores) (MACHADO, 1981).

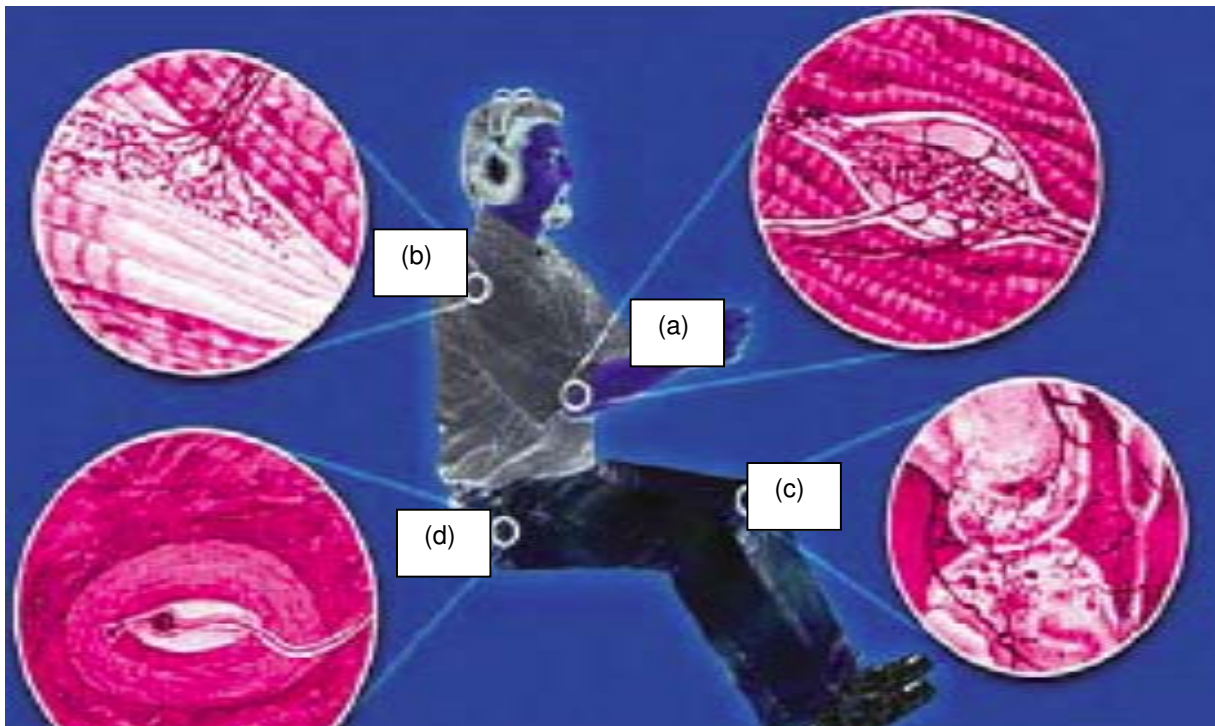


Figura 45 - Receptores do sistema proprioceptivo: fusos musculares (a); órgãos tendíneos de Golgi (b); terminações em buquê e terminações nervosas livres nas articulações (c); corpúsculo lamelar de Pacini e terminações de Ruffini (d).

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety>

2.1.3.1 Proprioceptores

Estes receptores são encontrados nos músculos, nos tendões e nas articulações.

2.1.3.1.1 Músculos e Tendões

Constituem-se em pequenas fibras musculares intrafusais que ficam paralelamente às fibras musculares extrafusais, maiores e comuns, e são encapsuladas, em parte de seu comprimento, por um saco preenchido de fluído. A inervação sensitiva dessas estruturas consiste, principalmente, de neurônios aferentes grandes e de condução rápida, que se originam como terminações primárias (anuloespirais) ou secundárias (buquê de flores) terminando nas células do corno anterior da medula e interneurônios. O estiramento do músculo extrafusil associado resulta em um aumento na frequência dos potenciais de ação no nervo aferente, a partir das fibras intrafusais; a contração, resulta em diminuição ou ausência dos potenciais de ação. As fibras musculares intrafusais são inervadas por motoneurônios (eferentes gama e outros) e podem ser estimuladas ao se contrair, alterando, desta forma, a informação aferente originada do fuso. O estímulo sensorial a partir dos fusos musculares pode ser alterado pelas influências descendentes provenientes de centros neurais mais altos, tal como o eixo vestibulocerebelar (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Embora os fusos musculares estejam estrutural e funcionalmente em paralelo com grupos musculares associados e respondam às mudanças no seu comprimento, os órgãos tendíneos de Golgi estão, funcionalmente, em série como os músculos e respondem às mudanças na tensão.

A principal função de ambos – fusos musculares e órgãos tendíneos – é de prover a base sensitiva para os reflexos miotáticos (ou de estiramento muscular). Esses reflexos medulares elementares funcionam ao estabilizar uma articulação pela proveniência, em resposta a um aumento no comprimento de um músculo e

concomitante estimulação de seus fusos incluídos, excitação monossináptica e contração do músculo agonista estirado (exemplo, extensor) e inibição dissináptica e relaxamento de seu músculo antagonista (exemplo, flexor), por meio da ação de um interneurônio inibitório. Em adição, a tensão desenvolvida nos órgãos tendíneos associados resulta em inibição dissináptica do músculo agonista, regulando a quantidade de contração gerada. O mecanismo de reflexo miotático é, de fato, o fundamento da postura e da locomoção (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

A modificação desses e outros reflexos espinhais básicos pela intervenção facilitadora ou inibidora originada em níveis neurais mais altos, seja por ação direta sobre os neurônios motores esqueléticos (alfa), ou através da estimulação dos neurônios fusimotores (primariamente gama) nos fusos musculares, resulta em equilíbrio postural sustentado e outros comportamentos motores posturais propositados. Alguns pesquisadores argumentam, contudo, que em certos tipos de desorientação espacial em vôo, essa modificação organizada dos reflexos espinhais fica interrompida quando o controle cortical da atividade motora é substituído pelo controle do tronco cerebral inferior e da medula. Talvez, a deterioração da capacidade de voar induzida pela desorientação do tipo “congelado-no-controle” seja um indicativo dos reflexos primitivos manifestados pela desorganização das funções neurais mais altas (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Há pouca evidência a indicar que a resposta aos estímulos de orientação (como os que ocorrem quando alguém fica em pé em um ambiente de 1-G) resulte em qualquer percepção proprioceptiva consciente correspondente. Todavia, é sabido que as colunas dorsais e outros tratos espinais ascendentes carregam informação aferente a núcleos de sinapse bulbar e talâmica e, assim, ao córtex sensitivo cerebral. Projeções estendidas ao cerebelo, via trato espinocerebelar dorsal e trato espinocerebelar ventral, garantem que a informação proprioceptiva, a partir das terminações aferentes dos fusos musculares e dos órgãos tendíneos, seja interpretada com outra informação orientadora, sofrendo sinapse nos núcleos vestibulares, córtex cerebral e em outros locais, conforme necessário (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.1.3.1.2 Articulações

Em contraste ao estímulo com o chamado senso muscular de posição tem sido bem estabelecido que a informação sensorial, a partir das articulações, alcança a consciência (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

De fato, o limiar para a percepção do movimento e da posição articular pode ser bastante baixo: tão baixo quanto 0,5 graus para a articulação do joelho, quando movida acima de 1,0 grau/segundo. Os receptores nas articulações são de três tipos:

- a) órgãos terminais corpusculares lamelados ou pacinianos encapsulados;
- b) estruturas tipo buquê, conhecidas como terminações tipo Rufini, quando encontradas nas cápsulas articulares e como órgãos tendíneos de Golgi, quando encontradas nos ligamentos;
- c) terminações nervosas livres.

Os terminais tipo corpúsculos de Pacini são rapidamente adaptativos e são sensíveis ao movimento rápido da articulação, enquanto que ambas as terminações tipo buquê são de adaptação lenta e servem para sinalizar movimento articular lento e posição articular. Há evidência de que os reflexos espinhais polissinápticos possam ser provocados pela estimulação dos receptores articulares, mas a sua natureza e a extensão não estão bem compreendidas.

A informação proprioceptiva, a partir dos receptores articulares, projeta-se eventualmente via funículos dorsais para o córtex sensitivo cerebral e via tratos espinocerebelares até o lobo anterior do cerebelo.

Não se deve inferir que somente músculos, tendões e articulações têm receptores sensoriais proprioceptivos. Ambos os receptores lamelados e os do tipo buquê, bem como as terminações nervosas livres, são encontrados em fâscias, aponeuroses e outros tecidos conjuntivos do sistema musculoesquelético e, presumivelmente, fornecem informação proprioceptiva ao sistema nervoso central (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.1.3.2 Exteroceptores

Localizam-se na superfície externa do corpo, onde são ativados por agentes externos como: calor, frio, pressão, luz, som, dentre outros (MACHADO, 1981).

Uma variedade de receptores está envolvida na mecanorrecepção: os corpúsculos tipo buquê de Ruffini, os corpúsculos lamelados de pacinianos e de Meissner, terminais lanceolados ramificados e retos, células de Merkel e terminações nervosas livres. Os padrões de resposta dos mecanorreceptores, também, são numerosos: foram reconhecidos onze tipos diferentes de resposta, variando da detecção transitória de alta frequência através de diversos modos de detecção da velocidade até a detecção de deslocamento mais ou menos estático (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Os corpúsculos pacinianos e certos receptores associados com folículos pilosos são, rapidamente, adaptáveis e têm as mais altas frequências mecânicas, respondendo a deslocamentos de pele sinusoidal na faixa de 50 a 400 Hz. Assim, são bem adequados para monitorar a vibração e estímulos táteis transitórios. Os corpúsculos de Ruffini são de adaptação lenta e, por conseguinte, respondem primariamente ao toque prolongado e estímulos de pressão.

As células de Merkel parecem ter uma resposta adaptativa moderadamente lenta, tornando-as adequadas para monitorar o deslocamento e a velocidade estática da pele. Os corpúsculos de Meissner parecem detectar, primariamente, a velocidade da deformação cutânea. Outros receptores fornecem outros tipos de resposta para completar o espectro de estímulos mecânicos que podem ser sentidos através da pele (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). A informação aferente a partir dos mecanorreceptores descritos é conduzida ao córtex cerebral, principalmente, via funículos dorsais e núcleos de sinapse bulbar para dentro dos lemniscos mediais e projeções talamocorticais. O trato espinocerebelar e outros tratos no cerebelo provêm as vias pelas quais a informação exteroceptiva cutânea alcança o cerebelo, que é integrada com a informação proprioceptiva a partir dos músculos, dos tendões, das articulações e dos órgãos vestibulares terminais (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2 Desorientação Espacial

O processo de evolução do ser humano se deu com base em diferentes ambientes como o aquático, terrestre e, mesmo, o arbóreo, mas nunca no aéreo. Ainda que a evolução humana tenha experimentado diferentes situações associadas a diversos tipos de movimento, nenhuma delas proporcionou algo tão diferente quanto a aviação.

O sonho humano de dominar o ambiente aeroespacial somente teve lugar a partir da criatividade humana, capaz de superar muitos obstáculos e criar condições favoráveis para o vôo, a partir de uma evolução tecnológica incrível.

No século XVIII foi possível a ascensão em balões, sendo que o feito marcante de Alberto Santos-Dumont (primeiro vôo com o mais-pesado-do-que-o-ar), em 1906, deu asas à aviação.

De modestos aeroplanos (Figura 46) a gigantescos cargueiros e caças de alta performance (Figura 47), a aviação avançou rapidamente, rompeu a barreira do som e alcançou o espaço, impondo ao homem, a cada avanço tecnológico, um novo desafio à superação de seu próprio limite fisiológico.



Figura 46 - Aeroplano Demoisele construído por Alberto Santos-Dumont.

Fonte: <http://www.14bis.mil.br>



Figura 47 - Caça Supersônico Sukhoi 30. Compara-se a pilotagem deste caça com o ato de tocar dois pianos ao mesmo tempo.
Fonte: <http://www.sukhoi.org>

Impossibilidade de adaptação fisiológica

Os sentidos humanos e a capacidade de orientação desenvolveram-se adaptados, por fim, à vida terrestre, predominando as informações visuais sobre os demais sistemas, o vestibulo-coclear e o proprioceptivo. Mesmo os pássaros, que possuem uma fisiologia adaptada ao meio de locomoção aéreo, quando sob condições de visibilidade restrita, se tornam incapazes de manter a orientação para voar de forma segura, a exemplo do que ocorre na neblina ou nas nuvens. Assim, quando a informação visual em vôo se torna precária, o ser humano encontra enorme dificuldade para se manter orientado, pois, neste caso, passam a predominar estímulos vestibulo-cocleares e proprioceptivos, não adaptados ao ambiente aéreo. Como estes sistemas têm como fonte principal de estímulo as acelerações, obviamente, em vôo, estarão submetidos às variações de magnitude de uma resultante, a partir dos movimentos da aeronave e da gravidade. Do ponto de vista fisiológico, em relação aos estímulos, se correlaciona o tipo de aceleração resultante e os sistemas envolvidos, com o tipo de ilusão gerada no piloto (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Há dois tipos de aceleração: linear (translação) e angular (rotação). No primeiro, o corpo movimenta-se em relação a um eixo fora do seu corpo; no segundo, o movimento ocorre sobre o eixo do próprio corpo. Pode haver conjugação dos dois tipos de aceleração em diversas situações que podem levar à desorientação espacial (BENSON, 1998).

A aviação mundial refere que cerca de 10% dos acidentes aéreos têm como causa preponderante a desorientação espacial, sendo que destes cerca de 90% são fatais. Frente à impossibilidade de adaptação fisiológica, o foco reside, então, na área da prevenção desse fenômeno, no sentido de minimizar a participação da desorientação espacial na gênese de acidentes aéreos (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

De maneira geral, divide-se a desorientação em três grupos, com base na possibilidade de o piloto reconhecer ou não a ocorrência do fenômeno, ou mesmo se tornar incapacitado: não-reconhecida (Tipo I), reconhecida (Tipo II) e incapacitante (Tipo III).

2.2.1 Desorientação Espacial Tipo I

Na desorientação não-reconhecida (Tipo I), o piloto não tem consciência do que está ocorrendo e, portanto, não percebe qualquer manifestação de desorientação, ou seja, não identifica qualquer disparidade em relação ao senso de orientação, não suspeita de um mau funcionamento dos instrumentos e tampouco sente que a aeronave pode estar em atitude anormal.

Neste tipo, o piloto, obviamente desorientado, voa e comanda a aeronave de acordo com uma falsa percepção em relação à orientação: “morre com sorriso na face!” (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.2 Desorientação Espacial Tipo II

Na desorientação reconhecida (Tipo II), o piloto identifica que está desorientado e opta por atuar de acordo com a indicação dos instrumentos de vôo do painel da aeronave (em vôo solo), ou por entregar o comando ao segundo piloto (em vôo duplo). Neste caso, um piloto treinado, em situações semelhantes poderá reagir de maneira adequada, se conseguir reconhecer o fenômeno antes que a atitude da aeronave ou mesmo a altitude impeçam alguma manobra corretiva (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Assim, a prevenção a partir do treinamento tem sido uma constante na formação e manutenção operacional dos pilotos em todo mundo, pois o que se deseja é que o piloto, frente à ocorrência de desorientação espacial, possa reconhecer o fenômeno a tempo de adotar uma atitude corretiva adequada, a partir de uma correta leitura dos instrumentos do painel da aeronave (BENSON, 1998).

2.2.3 Desorientação Espacial Tipo III

Na desorientação incapacitante (Tipo III), o piloto sofre efeitos fisiológicos que o incapacitam. Um dos estímulos prejudiciais aos sentidos, decorrentes da desorientação espacial – o nistagmo vestibular – pode comprometer tanto a leitura dos instrumentos no painel da aeronave quanto impedir uma visão estável de referências fora da aeronave. Também é possível ocorrer reflexos espino-vestibulares, a ponto de o piloto não conseguir controlar a aeronave. Pode haver, ainda, pânico ou medo extremo por parte do piloto, como decorrência do processo de desorientação espacial, a ponto de o mesmo se tornar incapaz de adotar uma atitude racional, situação referida no jargão da aviação como “cristalizar”, “congelar no comando”. O importante a respeito deste tipo de desorientação espacial é que o piloto está desorientado e reconhece o fenômeno, mas não consegue fazer nada a respeito (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.4 Ilusões em Vôo

Ilusão em vôo é uma falsa percepção de posição ou de movimento em relação à superfície da terra, que pode ser provocada tanto por aceleração linear quanto angular. Há um grande número de ilusões em vôo, sendo que os tipos abordados neste trabalho são elencados na literatura mundial como suficientemente impressionantes aos pilotos. Podem ser classificadas como visuais e vestibulares (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.4.1 Ilusões Visuais

Há diversas formas de se classificar e organizar as ilusões decorrentes de informações equivocadas por parte do sistema visual. A categorização da ilusão pode ser associada ao foco da visão ou ao ambiente. Tal sistemática é uma das mais utilizadas para se abordar o tema (HAWKINS, 2000).

2.2.4.1.1 Forma Constante

Destaca-se a que ocorre em decorrência de a pista assumir, na percepção do piloto, uma “constância na forma”, do inglês, *shape constancy*, ou, ainda, “forma constante”. Tendo o formato constante de uma pista na memória (Figura 48 a), ao se deparar com outra pista em aclive ou declive, o piloto pode ter uma ilusão. Por exemplo, numa situação de aproximação para pouso numa pista em aclive pode sofrer a ilusão de que está numa altitude mais alta, em função da perspectiva das linhas de contorno da pista, que parecerão mais longas e mais estreitas (quando comparadas ao “formato constante” da pista que tem na mente), fazendo com que ele venha a comandar a

aeronave de forma a posicioná-la em altitude mais baixa em relação à pista (Figura 48 b). Tal situação fará com que o cruzamento da cabeceira ocorra em menor altitude do que a prevista, colocando a aeronave numa circunstância perigosa. O oposto disso ocorre quando a pista encontra-se numa situação de declive, o que fará com que o piloto possa ter a ilusão de que está em altitude mais baixa. Tal correção, à custa de uma ilusão, ocasionará um cruzamento da cabeceira da pista em altitude superior à prevista, o que também colocará a aeronave numa situação perigosa (Figura 48 c) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

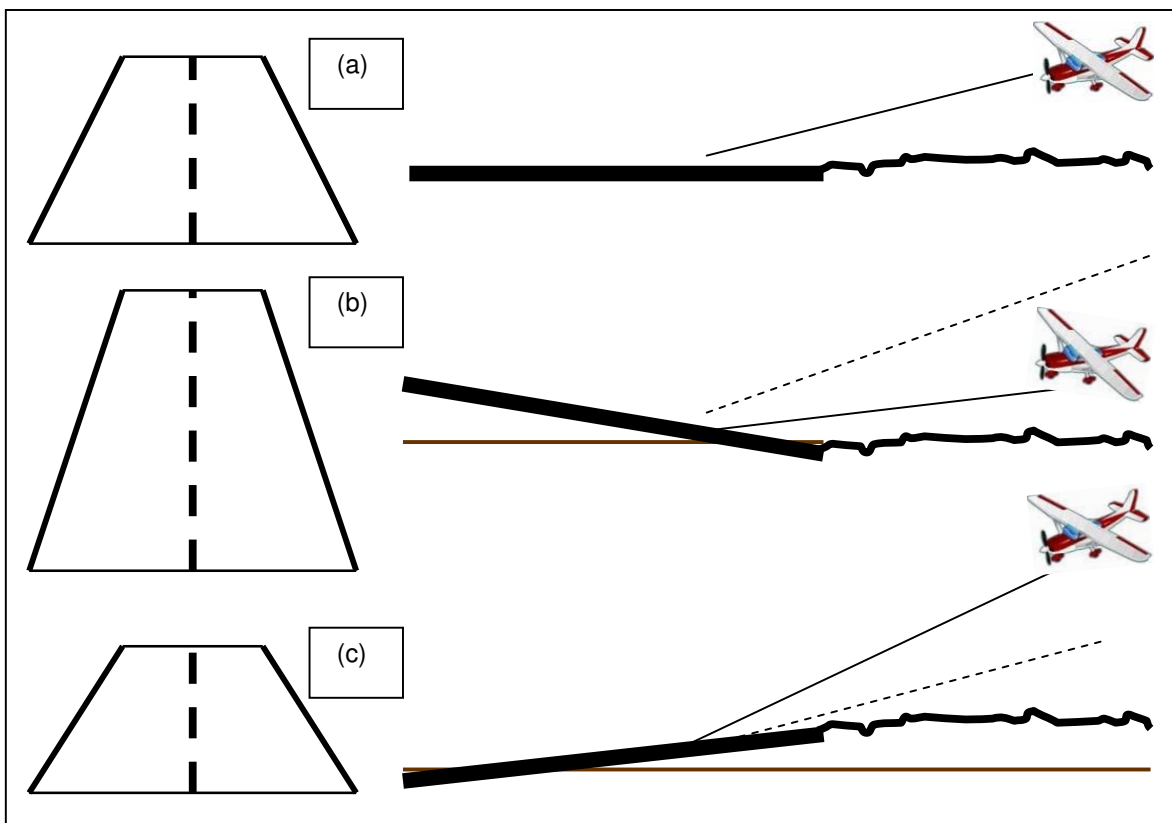


Figura 48 - Ilusão Visual "Forma Constante": com origem no foco da visão, em função da perspectiva, a aproximação é normal, numa pista em terreno plano (a); a operação numa pista em aclive dá ao piloto a ilusão de que está muito alto na aproximação, quando comparada à "forma constante" que traz na mente, a ponto de fazer correção para aproximar mais baixo, o que representa risco (a trajetória normal da aeronave está demonstrada em linha pontilhada) (b); ocorre o oposto, ou seja, a operação numa pista em declive dá ao piloto a ilusão de que está muito baixo na aproximação, a ponto de fazer correção para aproximar mais alto, o que também representa risco (a trajetória que seria normal para a aeronave está demonstrada em linha pontilhada) (c).

Fonte: O autor (2008).

2.2.4.1.2 Tamanho Constante

Outro exemplo ocorre quando o piloto, baseado no padrão das pistas que opera normalmente, passa a considerar, na percepção dele, uma “constância no tamanho” da pista, do inglês, *size constancy*, ou, ainda, “tamanho constante” (Figura 49), como se existisse apenas um padrão fixo para todas as demais.

Desta forma, uma pista mais estreita pode ser percebida pelo mesmo como uma aproximação em altitude acima do normal, pois ele a percebe como se ela estivesse ainda muito afastada (em comparação ao modelo de tamanho constante que traz na mente), o que implicará em correções enganosas e de risco para o procedimento de pouso (Figura 50).

O oposto disso é quando o piloto se depara com uma pista muito larga em relação a que está habituado a pousar (Figura 51), o que fará com ele a perceba como estando mais próxima, ou seja, aproximação muito baixa (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

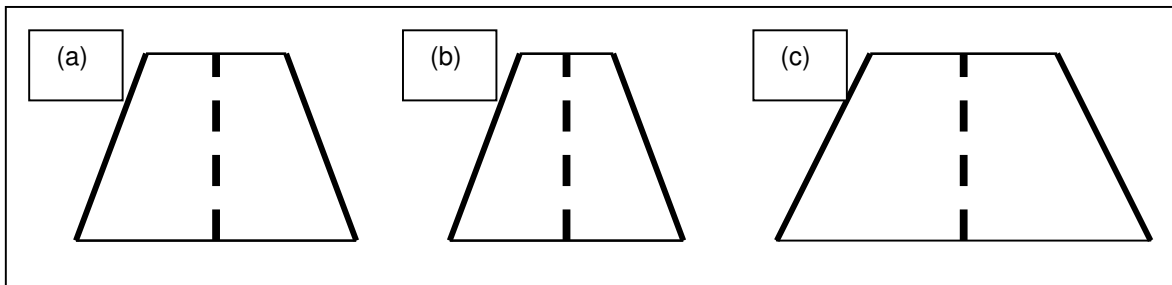


Figura 49 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho”: a aproximação é normal, numa pista em que o piloto está habituado a operar (a); uma pista mais estreita do que a que o piloto está habituado a operar dá a ilusão de que está muito alto na aproximação (b); uma pista mais larga do que a que o piloto está habituado a operar dá a ilusão de que está muito baixo na aproximação, a ponto de fazer correção para aproximar mais alto (c).

Fonte: O autor (2008).

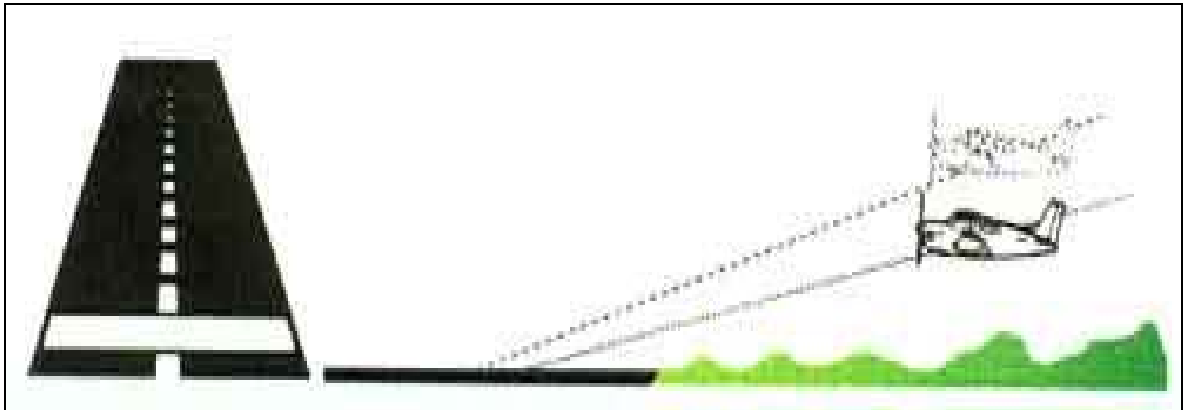


Figura 50 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho” (aproximação baixa). Ao operar numa pista mais estreita do que a que está habituado pode sofrer a ilusão de que está muito alto na aproximação.

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Visual07.jpg>

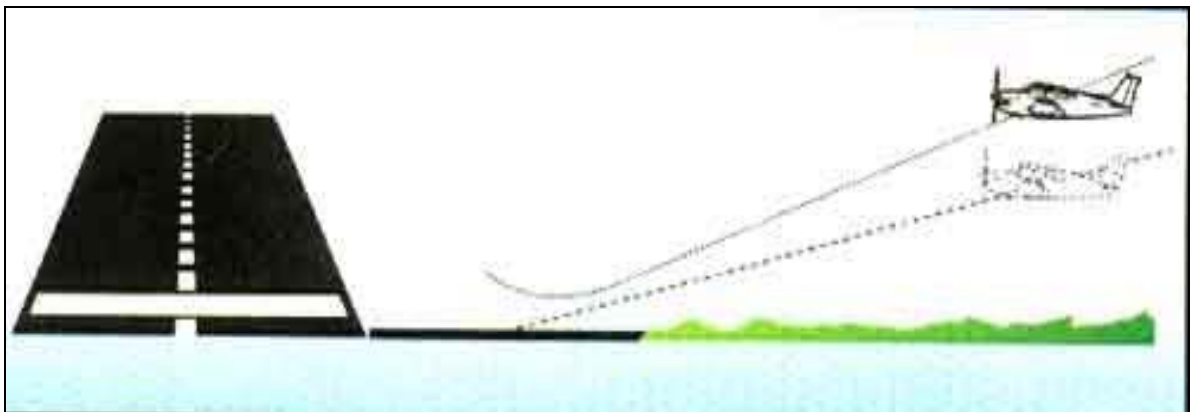


Figura 51 - Ilusão Visual “Constância no Tamanho” (aproximação alta). O piloto, ao operar numa pista mais larga do que a que está habituado a operar, pode sofrer a ilusão de que está muito baixo na aproximação, a ponto de fazer correção para aproximar mais alto.

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Visual08.jpg>

Outra ilusão semelhante pode ocorrer quando há inclinação do terreno na área de aproximação, o que poderá gerar problema de julgamento quanto à referência de atitude da aeronave em relação ao solo.

Se o terreno na área de aproximação (antes da cabeceira) for inclinado na descendente em direção à mesma, o piloto tenderá a voar mais alto a fim de manter o afastamento considerado adequado em relação ao solo (Figura 52 a).

Em circunstância oposta, se a inclinação do terreno na área de aproximação for afastando-se da cabeceira, o piloto tenderá a voar mais baixo (Figura 52 b) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

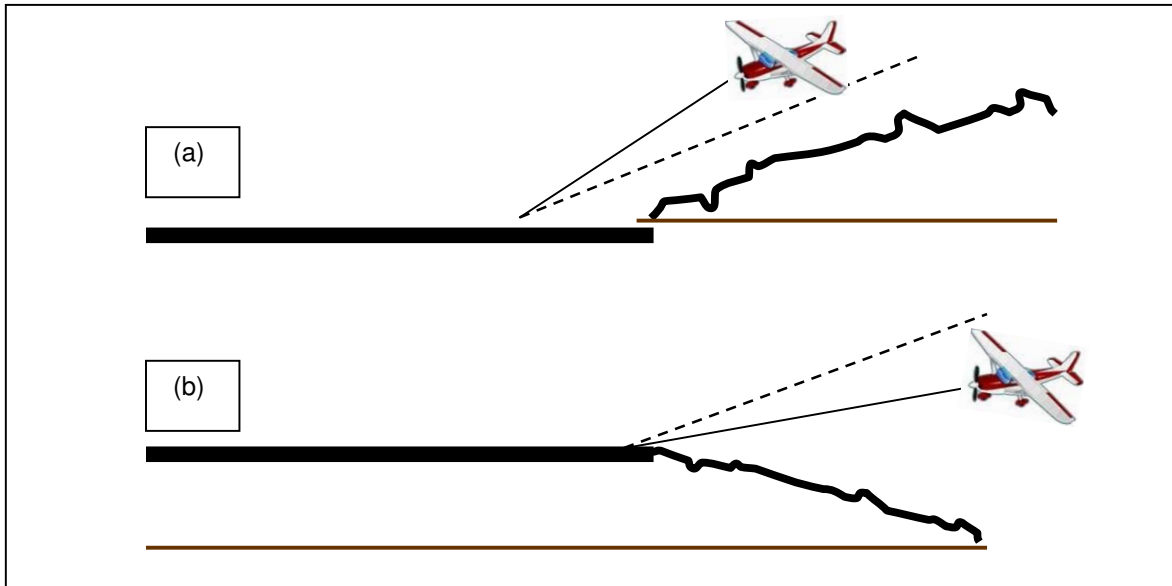


Figura 52 - Ilustração de Ilusão Visual (referência em relação ao solo): o terreno mais elevado próximo à cabeceira dá a ilusão de que está muito baixo na aproximação, o que o leva a corrigir a altitude de aproximação para cima, de forma a voar mais alto, o que pode representar risco (a trajetória normal da aeronave está representada pela linha pontilhada) (a); o terreno mais baixo próximo à cabeceira dá a ilusão de que está muito alto na aproximação, o que o leva a corrigir a aproximação para baixo, de forma mais baixa, o que também pode comprometer a segurança (a trajetória normal da aeronave está representada pela linha pontilhada) (b).

Fonte: O autor (2008).

Há, ainda, uma terceira situação relacionada ao “tamanho constante” que pode afetar o julgamento do piloto, por exemplo, quando a vegetação da área de aproximação se apresenta com as mesmas características de cor e aspecto, porém, com porte mais baixo do que a vegetação com a qual o piloto está acostumado (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Neste caso, o piloto tenderá a conduzir a aeronave numa aproximação mais baixa do que seria a adequada, o que pode gerar conseqüências desastrosas. Um piloto habituado a voar na Amazônia, cujas pistas tendem a ser do tipo não preparadas e longe das cidades, cercadas por vegetação com pouco contraste e por árvores muito altas (Figura 53 a), ao voar em outras regiões com árvores muito mais baixas, poderá experimentar esse tipo de ilusão (Figura 53 b).

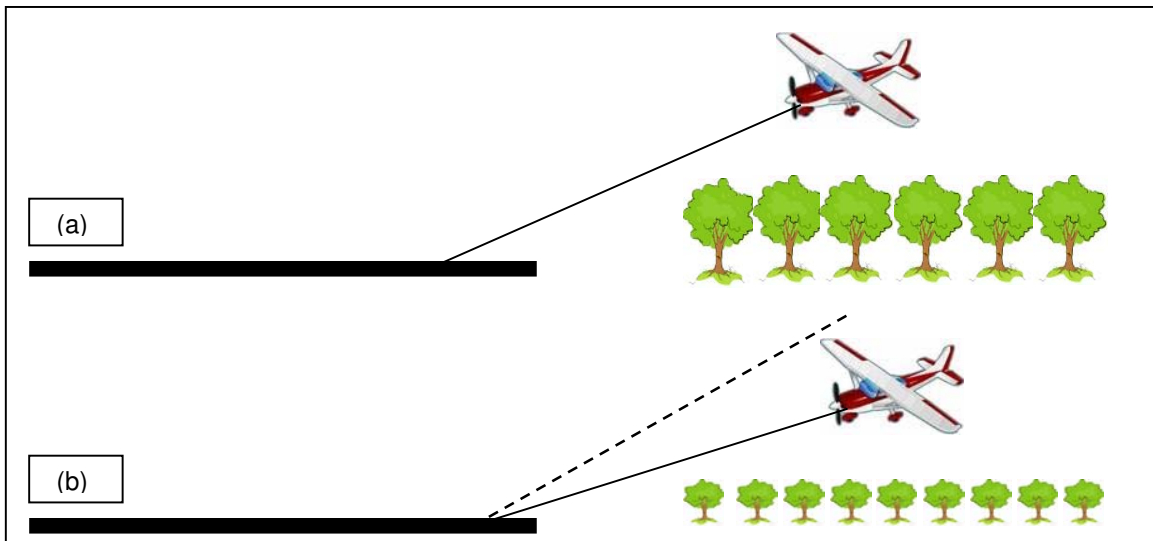


Figura 53 – Aproximação sobre vegetação: o piloto habituado a operar em pistas cercadas por vegetação composta por árvores altas (a), ao operar em pista cercada por árvores mais baixas, de mesma tonalidade e mesmo aspecto na copa, tenderá a aproximar mais baixo (b). A trajetória normal da aeronave está representada pela linha pontilhada.

Fonte: O autor (2008).

2.2.4.1.3 Falta de referenciais no ambiente

Situações de falta de referenciais visuais no ambiente durante o procedimento de aproximação não são incomuns, sendo que há, ainda, diversos outros tipos de ilusão visual, principalmente no que diz respeito à falta de contraste ocasionada pela baixa visibilidade ou mesmo predominância de uma cor ou de uma mesma tonalidade de cor. Durante a operação na neve, por exemplo, como a que ocorre na Antártida, onde opera a Força Aérea Brasileira (FAB), há diversos relatos de pilotos a respeito desse assunto.

Há dois tipos de deficiência de referencial em relação à cor branca que predomina no ambiente (do lado de fora da cabine): um relacionado à condição atmosférica com céu encoberto e terreno completamente coberto por neve, onde o horizonte se torna indistinguível pela falta de contraste em o solo e o céu; outro, relacionado à nevasca, onde os flocos de neve impedem a visibilidade (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

A operação de pouso e decolagem das aeronaves Hércules C-130 da FAB se dá na Base Chilena Eduardo Frei, sendo que os pilotos, mesmo os mais experientes, podem enfrentar dificuldades extremas em determinadas circunstâncias, sob visibilidade restrita, mesmo com auxílio de meios eletrônicos à aproximação.

Na Antártida, tais restrições de visibilidade podem ocasionar falsa percepção de altitude e de posição, tanto em relação ao horizonte quanto em relação à cabeceira da pista, em função de a neve cobrir toda a superfície do continente e também o oceano que o cerca, devido ao congelamento da superfície da água (Figura 54).



Figura 54 - Aeronave Hércules C-130 do 1º/1º Grupo de Transporte da FAB, pousada na Antártida: pouso em condições mínimas de visibilidade, durante o mês de julho (inverno naquele continente), em 1994, na Base Aérea Chilena Eduardo Frei.

Fonte: O autor (1994).

A operação na neve gera elevado estresse na tripulação, pois requer uma pilotagem extremamente cuidadosa não somente em função da possibilidade de ocorrência de ilusão, mas, também, em razão do procedimento a ser adotado para frenagem da aeronave (aplicação da reversão), tempo de permanência no solo, medidas anti-congelamento, dentre outras peculiaridades. Como um cobertor branco, a neve cobre todas as referências que poderiam gerar algum tipo de contraste, sendo que

a temperatura pode se tornar muito baixa, a ponto de limitar a permanência da aeronave no solo em algumas horas (Figura 55). A sensação térmica pode representar um fator de estresse adicional, em razão do vento e da nevasca, chegando a trinta graus Celsius negativos (-30° C) ou menos.



Figura 55 - Nevasca: na foto, o então 1º Tenente Médico da Aeronáutica CLOER junto à aeronave Hércules C-130 da FAB, após pouso na Antártida, sob condições meteorológicas adversas, tendo vivenciado exatamente o que se descreve na literatura a respeito de operação na neve.

Fonte: O autor (1994).

2.2.4.1.4 Buraco Negro

Há, ainda, um tipo de ilusão ocasionada pela dificuldade de se estabelecer referências visuais em função de visibilidade restrita à noite, denominada “buraco negro”, do inglês, *black-hole*. Tal situação pode ocorrer no vôo noturno sobre a água ou mesmo sobre o terreno sem iluminação próximo à pista, sem definição da linha do horizonte. Neste caso, somente se percebe as luzes de balizamento da pista. Como não há auxílio da visão periférica, dada a ausência de referenciais no ambiente que

circunda o aeródromo, o piloto “tende a perceber” que a aeronave está estabilizada e que a pista é que está se movendo, portanto, ficando mal posicionada para a aproximação, o que o leva a fazer diversas correções, o que, comumente, induz a um pouso curto (Figura 56). Este tipo de ilusão pode ocasionar grave desorientação em pilotos de helicóptero, que se utilizam bastante das referências do solo para aproximação para pouso (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

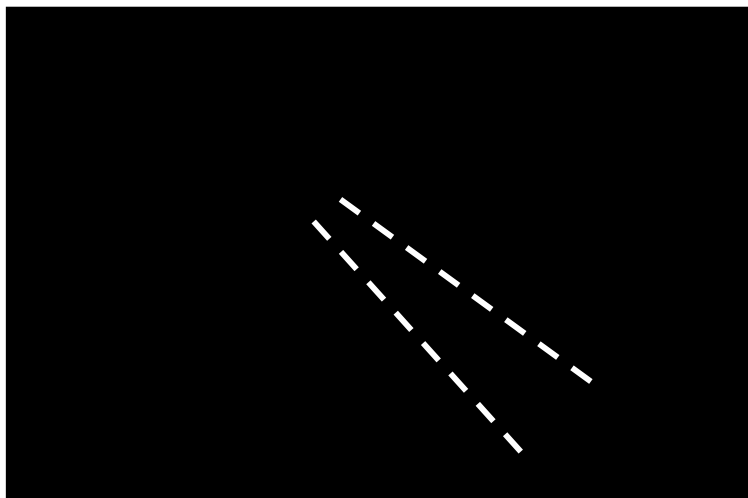


Figura 56 - Ilusão do tipo buraco negro: o piloto percebe a pista se movendo durante a aproximação, em virtude da falta de outras referências, além das luzes da pista.
Fonte: O autor (2008).

Também durante a noite, ocorre outra variação de aproximação perigosa provocada pela ilusão do tipo buraco negro, quando a superfície terrestre está totalmente escura e não há, portanto, referências visuais, exceto as luzes da pista e de uma cidade, neste caso, localizada além do aeródromo. Nesta crítica condição, o piloto tende a tocar no solo antes da pista, pois mantém um ângulo de visada vertical constante em relação às luzes da cidade, que estão mais distantes, adiante da cabaceira da pista, o que o faz curvar na aproximação final, abaixo da altitude prevista, uma vez que está se orientando por uma falsa referência (GILLINGHAM; PREVIC, 1996) (Figura 57).

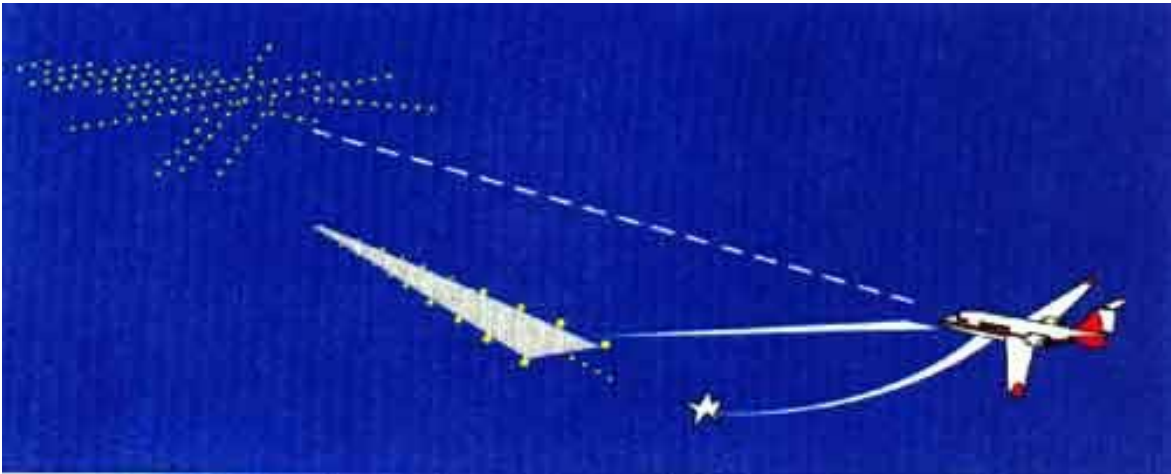


Figura 57 - Ilusão do tipo buraco negro (luzes da cidade): o piloto mantém uma linha de visada vertical em relação às luzes da cidade, o que o leva a fazer uma curva em altitude mais baixa do que seria a normal, tornando o procedimento particularmente perigoso quanto à colisão com obstáculos antes da pista.

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Visual11.jpg>

Vôo em formação e o maior risco de ilusão

A falta de referência visual à noite pode comprometer, também, os vôos em formação, onde os pilotos podem ter dificuldade em se posicionar em relação à aeronave do líder. Os mais experientes terminam por fixar as luzes de navegação da aeronave do líder em determinada posição em relação ao canto do pára-brisa (canopi) de sua aeronave, a fim de que, a partir desta posição, ele consiga executar os movimentos com a sua aeronave, mantendo sempre a mesma posição relativa. Há, ainda, outro fator de complicação nesses vôos, pois a ilusão por aceleração costuma dificultar a percepção de movimento. Por exemplo, se a distância entre duas aeronaves voando na mesma formação aumenta, o piloto da aeronave que está mais atrás talvez não consiga reconhecer uma entre duas possibilidades: a sua aeronave está acelerando ou a que está à frente está desacelerando? Fenômeno idêntico se pode experimentar ao se estar parado num carro num semáforo enquanto o carro ao lado arranca (movimento relativo). A percepção é a de que o próprio carro iniciou a se mover para trás, quando, na verdade, continua parado. Este tipo é denominado de ilusão de paralaxe. O vôo em formação aumenta o risco de desorientação espacial (Figura 58) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).



Figura 58 - Vôo em formação: aeronaves F-5 Tiger II, do 1º/14º Grupo de Aviação, da FAB, sediado na Base Aérea de Canoas (BACO), Rio Grande do Sul.

Fonte: Acervo do 1º/14º GAV, Base Aérea de Canoas.

O grau de dificuldade aumenta ainda mais em se tratando de vôos acrobáticos, onde a distância entre as aeronaves é muito pequena e as manobras não permitem margem a erro (Figura 59).



Figura 59 - Esquadrilha da Fumaça: formação acrobática onde se evidencia a proximidade entre as aeronaves.

Fonte: <http://www.fab.mil.br/eda>

2.2.4.1.5 Autocinese

Em relação às ilusões visuais, faz-se necessário, destacar, também, o fenômeno denominado autocinese, que ocorre quando uma única fonte luminosa, ou poucas luzes agrupadas, são percebidas como se estivessem se movendo, quando, na verdade, estão paradas. Uma luz de baixa intensidade contra um fundo escuro e sem outras referências visuais pode acarretar o fenômeno, que costuma ocorrer após 6 a 12 segundos quando se fixa a visão num ponto luminoso com essas características. O ponto parece se mover em diversas direções podendo alcançar até cerca de 20º de deslocamento. Ao contrário, quanto maior a fonte luminosa e maior a intensidade do brilho, menores serão as chances de ocorrer autocinese. A explicação fisiológica para este fenômeno não está definida, sendo que alguns autores sugerem que os olhos, por não captarem uma referência visual adequada, tendem a mover-se involuntariamente frente à inadequada estabilização vestibular, o que estimularia atividade oculomotora eferente (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Dentre as diversas orientações que os pilotos recebem para evitar o fenômeno da autocinese estão: evitar fixar de forma prolongada um ponto luminoso; posicionar o ponto luminoso em relação ao canopi da aeronave a fim de estabelecer uma referência de posição; movimentar os olhos, a cabeça e o corpo para minimizar o mecanismo de desencadeamento do fenômeno; confiar sempre nos instrumentos de vôo para resolver conflitos de percepção (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.4.1.6 Falso Horizonte

Também pode ocorrer de o piloto ter a ilusão de o horizonte não estar na horizontal, ou seja, percebendo-o como estando inclinado, a partir de falsas referências no ambiente. Tal situação tende a ocorrer em vôo sobre nuvens que possuem contorno inclinado ou em vôo dentro de cânion, cujo relevo pode ser inclinado, especialmente à

noite, quando o piloto pode confundir o horizonte com o solo, em função da falta de referenciais ou mesmo confundir as estrelas com as luzes no solo (Figura 60) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).



Figura 60 - Falso horizonte: durante uma aproximação noturna, o piloto tenderá a alinhar a aeronave com o suposto horizonte à frente, sendo que essa linha do horizonte adotada como referência poderá induzir a equívoco, pois se trata somente das luzes da cidade. Desta forma, poderá haver diferença quanto à real posição da linha do horizonte verdadeira e a aeronave, alinhada pelo com o suposto horizonte, poderá estar em curva. Tal situação se deve ao fato de o piloto sofrer uma ilusão visual que o faz perceber a linha de luzes da cidade como se fosse o horizonte verdadeiro, em função de céu encoberto ou mesmo em vôo noturno. O piloto pode não perceber que está voando inclinado ou em curva. Casos semelhantes têm sido referidos por pilotos de helicóptero da FAB ao se aproximar em vôo noturno da área conhecida como Restinga da Marambaia, no litoral do Rio de Janeiro/ RJ, cujo contorno é em forma de cunha.

Fonte: http://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/SpatialID_Seeing.pdf

2.2.4.2 Ilusões Vestibulares

As ilusões vestibulares ocorrem em função da falta de referência visual, quando passam a predominar os estímulos vestibulares oriundos dos canais semicirculares e dos órgãos otolíticos. As ilusões do tipo somatogiratórias (desnivelamento, a espiral mortal e o efeito Coriolis, por exemplo) estão relacionadas aos canais semicirculares; as do tipo somatogravitacionais, aos órgãos otolíticos (oculogravitacional, efeito de excesso de força G, inversão) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.4.2.1 Ilusões Somatogiratórias

Espiral Mortal

Decorre de uma falsa percepção de rotação, ou ausência de rotação, quando o indivíduo é submetido a um movimento de rotação prolongado, ou seja, com velocidade angular constante, em função da incapacidade de os canais semicirculares em detectar, de forma apurada, uma rotação prolongada (BENSON, 1998). O início do movimento é percebido em função da aceleração, sendo que com o passar de alguns segundos (10 segundos), se não houver uma desaceleração e a velocidade permanecer constante, a sensação de curva irá diminuir gradativamente até, eventualmente, desaparecer como estímulo à cúpula, que retornará à posição de repouso (sem movimento). A partir deste momento, a sensação obtida pelo piloto é a de que não está mais em curva.

No entanto, ao desacelerar a aeronave, a endolinfa que estava parada deslocará a cúpula na direção oposta, dando a impressão de que a aeronave iniciou uma curva para o outro lado (Figura 61).

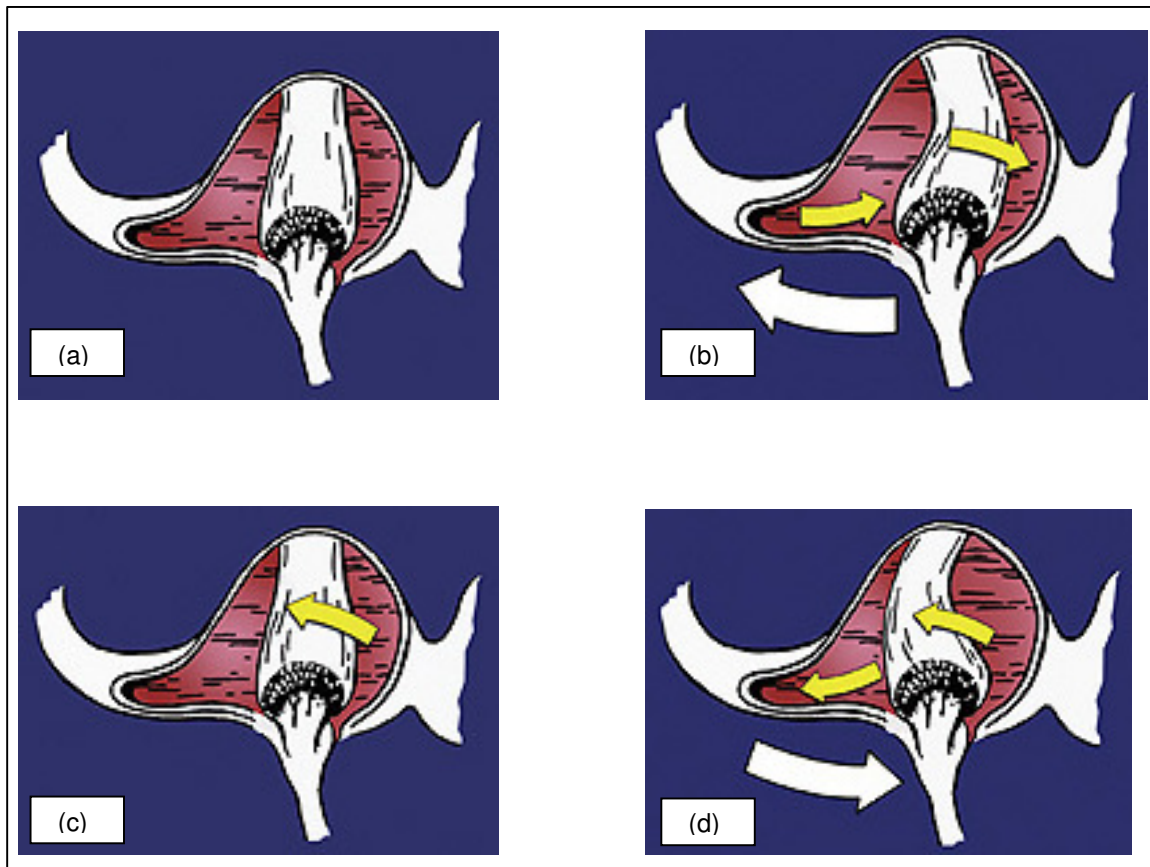


Figura 61 - Ilusão vestibular do tipo Somatogiratória. Em condição de visibilidade restrita, o piloto que vinha voando reto e nivelado (a), inicia uma curva percebendo o movimento em função da aceleração angular (b); após alguns segundos em velocidade angular constante (10 a 20 segundos), cessa a indicação vestibular de movimento em curva, em virtude de a crista ampular ter retornado à posição de repouso (c); ao desfazer o movimento, o piloto tem a sensação de que iniciou uma curva para o outro lado (d), em função da resposta baseada na inércia da endolinfa, dentro do canal semicircular; tal indicação faz com que o piloto desfça a manobra e retome a curva em que se encontrava antes, de forma ainda mais acentuada. Tal atitude, se não percebida a tempo poderá ser fatal. A ilusão clássica é conhecida como espiral mortal.

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Statfirst.jpg>

Apesar de ser imensamente conhecido e exaustivamente comentado no mundo da aviação, continua a ocorrer de forma significativa, pois o tipo de manobra que pode provocar a ilusão somatogiratória está presente em diversos momentos do voo. Se o piloto não reconhecer a ilusão, sobrevirá a desorientação espacial, quando restará pouca ou nenhuma chance de o piloto desfazer o movimento, que o levará até o chão (Figura 62) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

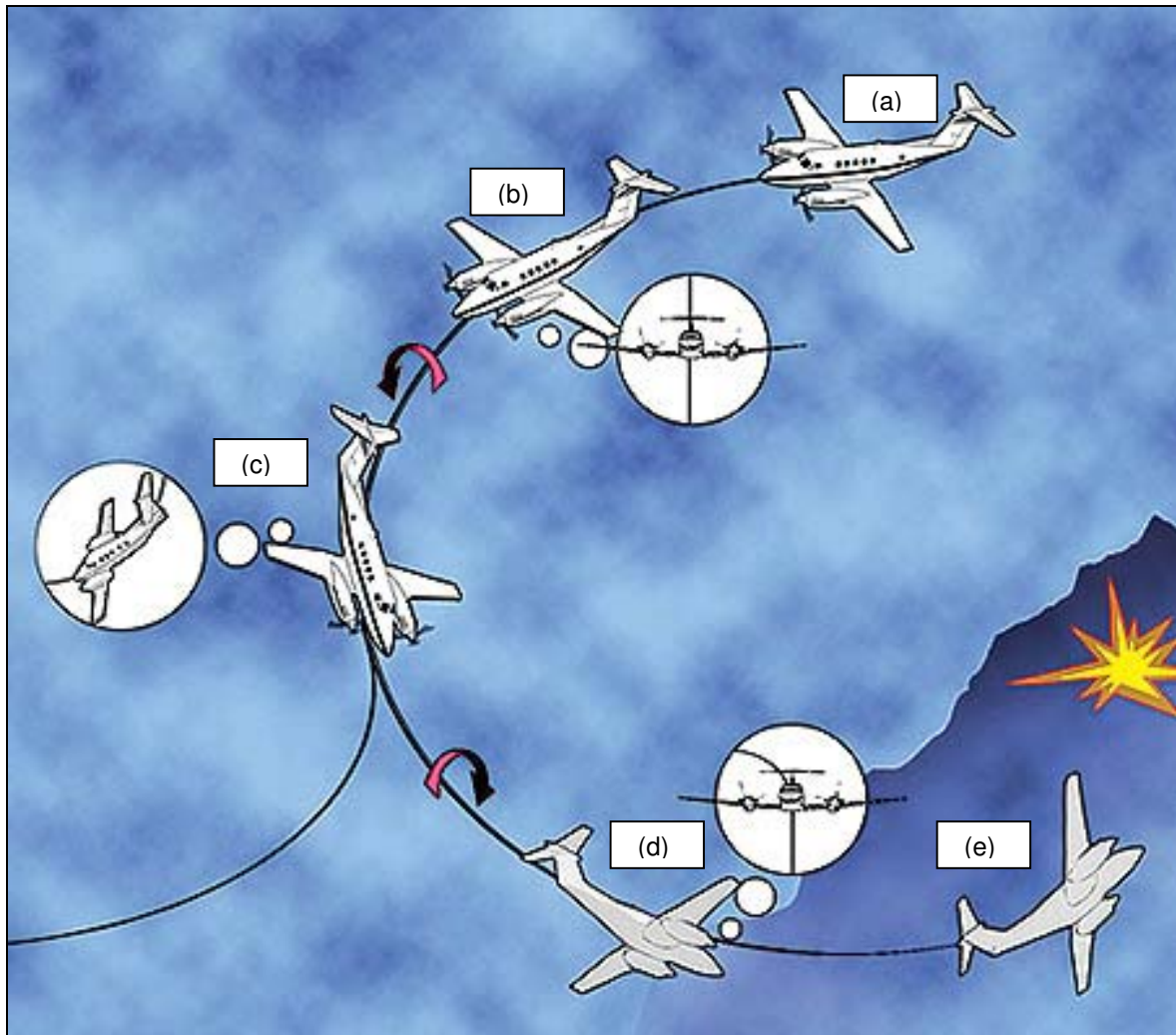


Figura 62 - Espiral mortal: partindo de uma condição de voo reto e nivelado, sob visibilidade restrita (a), o piloto inicia uma lenta curva para a esquerda; após alguns segundos (estabilização da endolinfa nos canais semicirculares), o piloto passa a ter a sensação de que o movimento cessou (b), apesar de os instrumentos acusarem o giro para a direita; ao tentar desfazer o movimento, passa a ter a sensação de que iniciou um movimento para a direita (c), o que faz com que novamente coloque a aeronave em giro para a direita (d). Se tal condição ocorrer à baixa altitude, a aeronave poderá colidir com o solo (e).

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Gravespiral.jpg>

Há, ainda, uma variação da espiral mortal, denominado parafuso mortal, que tende a ocorrer a partir de um número de giros para o mesmo lado, à velocidade constante (Figura 63).

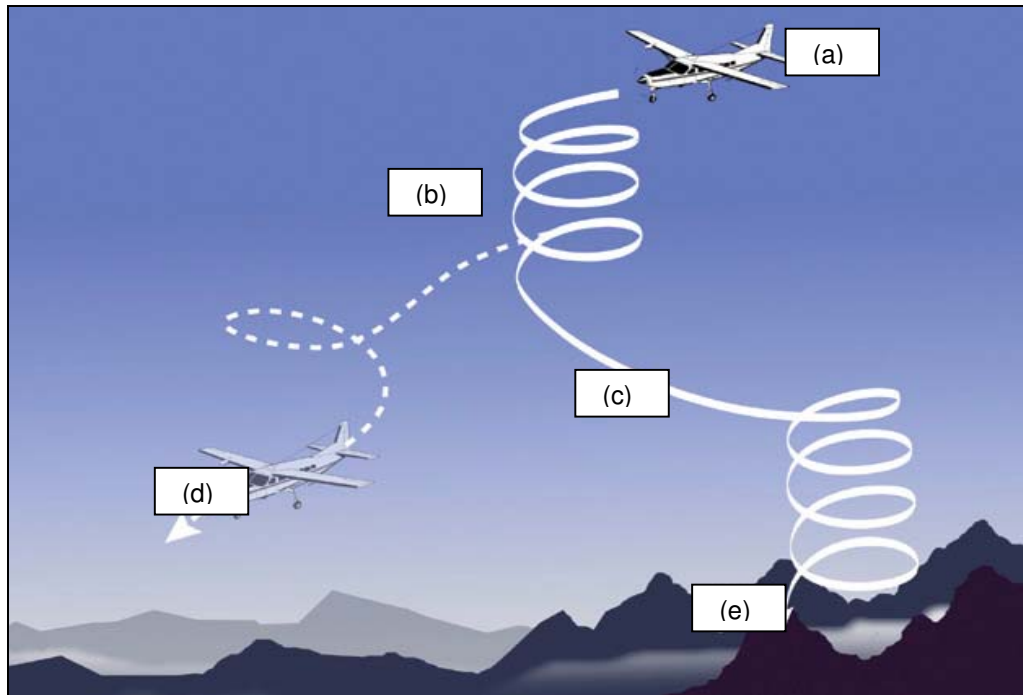


Figura 63 - Parafuso mortal: partindo de uma condição de vôo reto e nivelado, sob visibilidade restrita (a), o piloto inicia uma série de curvas para a esquerda (b); após alguns segundos (estabilização da endolinfa nos canais semicirculares), o piloto passa a ter a sensação de que o movimento cessou (c), apesar de os instrumentos acusarem o giro para a esquerda; ao tentar desfazer o movimento, passa a ter a sensação de que iniciou um movimento para a direita (d), o que faz com que novamente coloque a aeronave em giro para a esquerda (e). Se tal condição ocorrer à baixa altitude, a aeronave poderá vir até o chão.

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Gravespin.jpg>

Ilusão de Coriolis

Trata-se de uma falsa percepção que pode resultar de uma estimulação dos canais semicirculares. A fim de ilustrar o fenômeno, considera-se que um sujeito está em rotação dentro de uma aeronave o tempo suficiente para ter a sensação de que não está mais em rotação (por não haver mais aceleração, a endolinfa dos canais semicirculares mantém a cúpula na posição estacionária, ainda que haja movimento). Ao mover a cabeça para frente ou para trás, o indivíduo estimula mais um grupo de canais semicirculares (verticais), ao mesmo tempo em que retira os canais semicirculares horizontais do plano de rotação da aeronave. O estímulo é vigoroso e

produz sensação de rolamento para o lado oposto da curva em que se encontrava ou sensação de nariz para baixo ou para cima (Figura 64).



Figura 64 - Ilusão de Coriolis: estimulação simultânea de mais de um par de canais semicirculares.

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/SpatialID.pdf>

Nessa situação, as correções feitas pelo piloto serão equivocadas, o que poderá colocar a aeronave em atitude anormal, sendo difícil a recuperação, principalmente se o fenômeno ocorrer numa aproximação para pouso, quando na necessidade de o piloto poderá checar alternadamente instrumentos, com movimentos de cabeça. Tal fenômeno costuma ocorrer em vôo por instrumentos em aeronaves de alta performance (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Desnivelamento

Trata-se da forma mais comum de ilusão vestibular, sendo que qualquer piloto experimentado já deve ter tido este tipo de ilusão. Este fenômeno consiste de uma falsa percepção de ângulo de posicionamento em relação ao eixo X (*roll*). Tal efeito decorre da conhecida deficiência sensorial dos canais semicirculares, que somente são estimulados a partir de certo limiar de aceleração. Portanto, os estímulos subliminares não são percebidos. Se houver, por exemplo, um rolamento com aceleração menor do que 2 graus/segundo, isso não será percebido (BENSON, 1998) (Figura 65).



Figura 65 - Desnivelamento: piloto é submetido à inclinação subliminar para a direita; ao checar os instrumentos, percebe a inclinação e corrige (a); ao executar a correção para o centro, passa a ter a sensação de que se inclinou para a esquerda (b); tal sensação ocorre em virtude de que a inclinação inicial para direita foi subliminar, portanto, não-percebida (posição adotada pelo sistema vestibular como sendo a normal).

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/SpatialD.pdf>

2.2.4.2.2 Ilusões Somatogravitacionais

Os órgãos otolíticos são responsáveis por uma série de ilusões conhecidas como somatogravitacionais. O mecanismo envolvido neste tipo de ilusão é o fato de a membrana otolítica da mácula ser estimulada por aceleração linear. Um dos exemplos desse fenômeno é o que ocorre durante a decolagem ou durante navegação à baixa altura, quando o piloto tem a sensação, ao acelerar rápido a aeronave, de que o nariz da mesma está subindo demais, apontando para cima (*pitch up*), o que poderá levá-lo a baixar o nariz para compensar tal atitude (*pitch down*). Como se trata de uma falsa informação (ilusão), a “correção” poderá ser desastrosa, uma vez que este fenômeno costuma ocorrer à baixa altura, logo após o recolhimento do trem de pouso e dos flapes ou mesmo durante uma navegação. O fenômeno ocorre em virtude da aceleração da aeronave para frente, o que provoca uma força de inércia na mácula para trás. A conjugação da força de inércia para trás (mácula) com a força da gravidade gera uma resultante com orientação para baixo e para trás, o que faz com que haja percepção de movimento como se a aeronave estivesse subindo. Manobras com grande carga G+ também podem produzir fenômeno semelhante (Figuras 66 e 67) (BENSON, 1998).

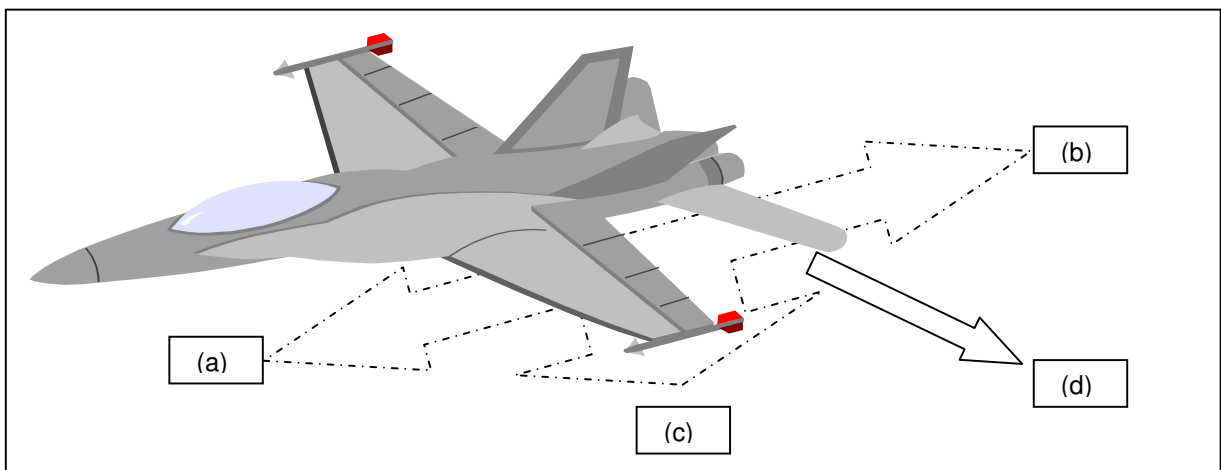


Figura 66 - Ilusão somatogravitacional: costuma ocorrer na decolagem de uma aeronave de caça ou mesmo durante navegação à baixa altura. A aceleração da aeronave para frente (a) cria uma força de inércia na mácula para trás. A combinação da força de inércia para trás (b) com a aceleração da gravidade (c) cria uma terceira força (resultante) com orientação para baixo e para trás, o que é percebido pela mácula (d). O piloto “sente”, então, o nariz da aeronave subindo, o que o leva a empurrar o manche à frente para efetuar correção, perdendo altitude.

Fonte: O autor (2008).

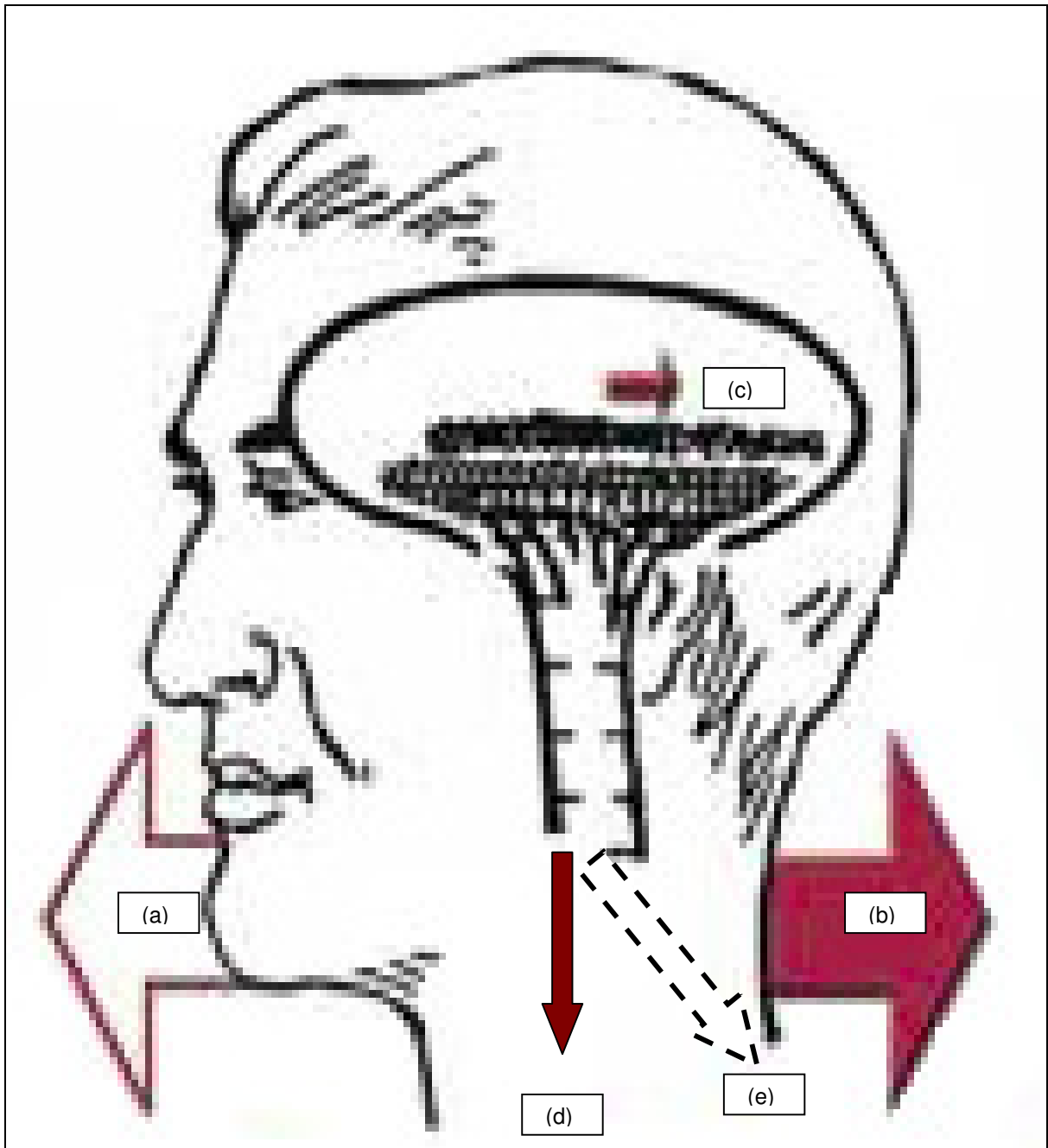


Figura 67 - Aceleração linear: a aceleração da aeronave para frente (a) cria uma força de inércia para trás no corpo (b) do piloto e, conseqüentemente, na mácula (c); a combinação da força de inércia para trás (b) com a aceleração da gravidade (c) pode resultar na percepção de que a aeronave realizou movimento para cima, em função da força de inércia resultante, que tem orientação para baixo e para trás (e). A correção do piloto, sob ilusão somatogravitacional, seria baixar o nariz da aeronave, uma vez que a teria percebido com tendência a subir.

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/SpatialD.pdf>

Ilusão de Inversão

Outro exemplo de ilusão somatogravitacional é a chamada ilusão de inversão, que pode ocorrer quando a aeronave que se encontra numa subida, ao alcançar o nível de vôo desejado, diminui, abruptamente, a velocidade. Tal circunstância faz com que o piloto experimente uma força G negativa ($G z-$) e tenha a sensação de que iniciou um giro para trás, o que fará com que tenda a corrigir tal sensação com o comando de baixar o nariz da aeronave (*pitch down*), o que agravará ainda mais a falsa sensação (Figura 68) (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

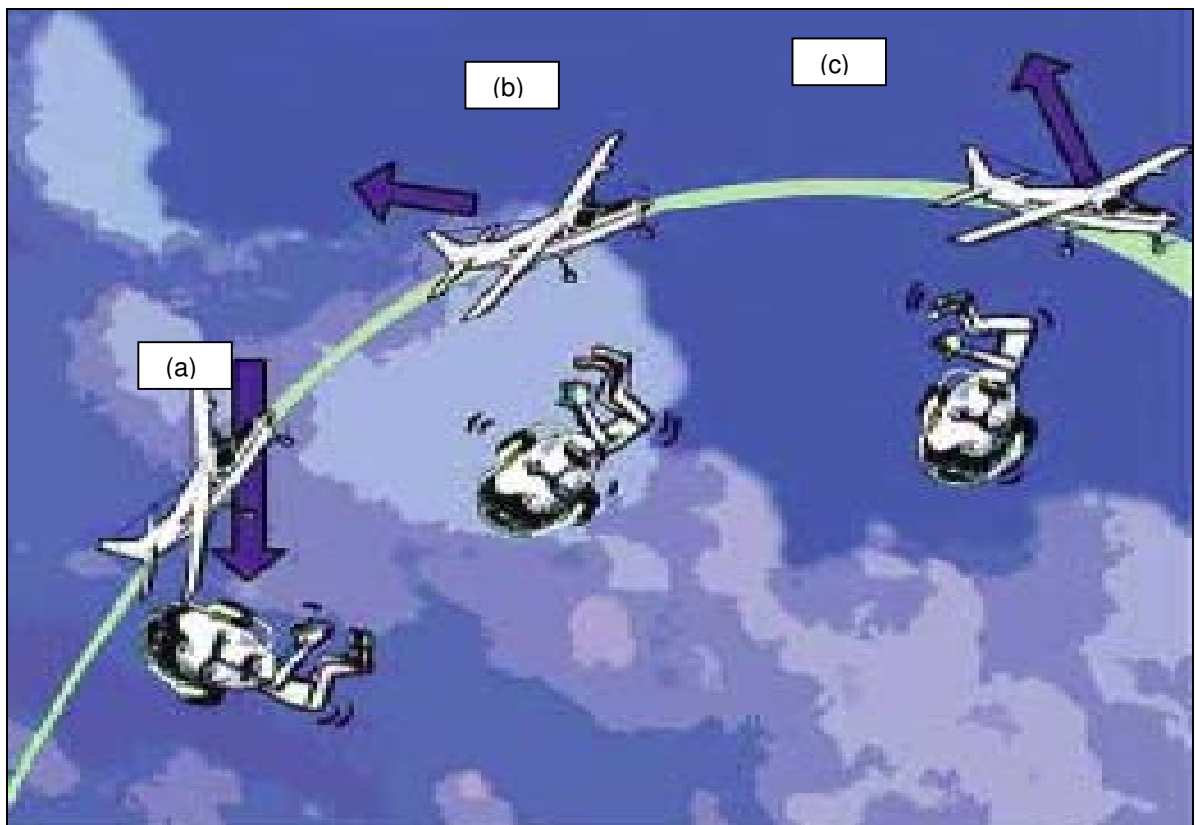


Figura 68 - Ilusão de inversão: durante uma subida se produz uma determinada força resultante (a) percebida pelo piloto; ao alcançar a altitude desejada, abruptamente, ao diminuir a velocidade, tem a sensação de inversão do movimento, agora para trás (b); a correção para tal sensação é colocar o nariz para baixo, o que, justamente, aumenta a sensação de giro para trás (c).

Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/SpatialD.pdf>

Fenômeno da Mão Gigante

Há, ainda, outro tipo de fenômeno capaz de gerar desorientação espacial, conhecido como “mão gigante”, do inglês, *giant hand*, percebido pelo piloto como algo que empurra uma das asas para baixo (Figura 69). Existem vários mecanismos envolvidos na gênese deste fenômeno, sendo destacado como principal o conflito entre a percepção pré-consciente e a percepção consciente da orientação, pois muitos dos estímulos relacionados à orientação (reflexos posturais, por exemplo) não passam pela consciência (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

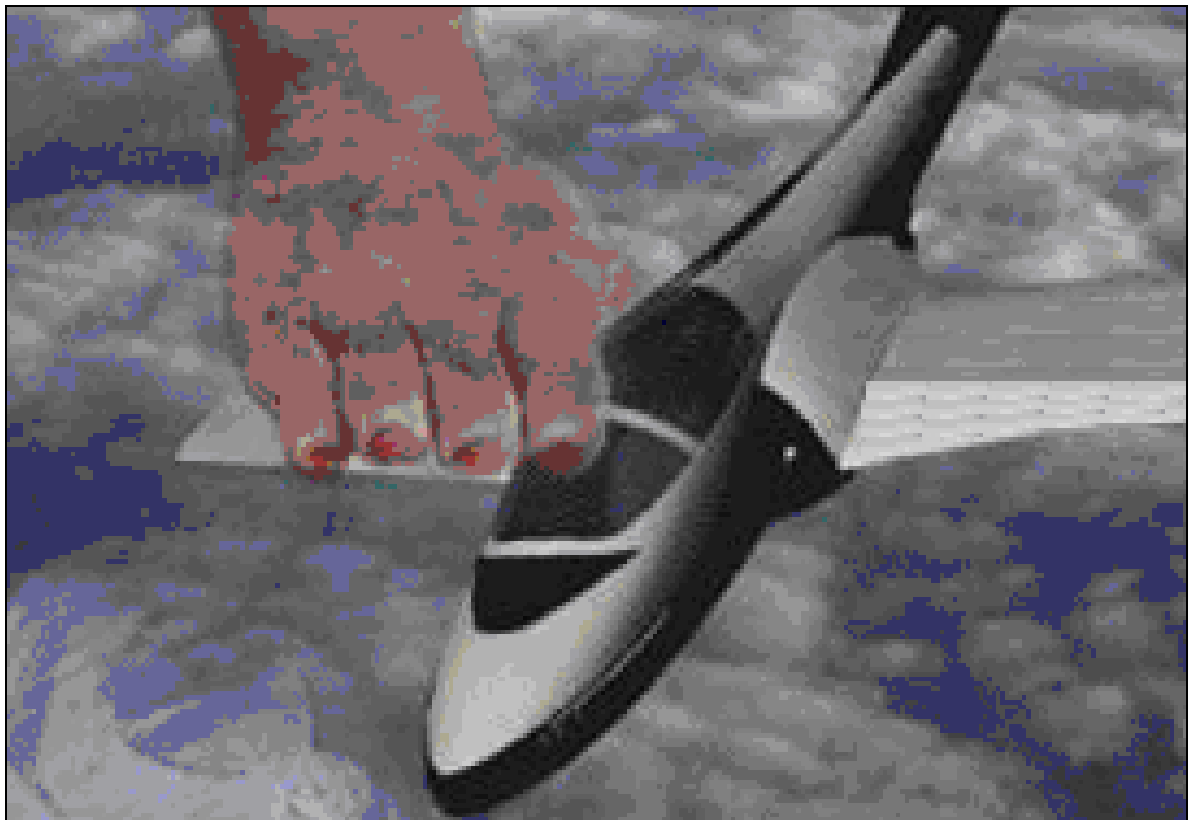


Figura 69 - Mão gigante: o fenômeno da mão gigante faz com que o piloto desorientado sinta uma resistência da aeronave quanto à correção de atitude, como se existisse uma mão gigante mantendo a inclinação da mesma, contrariando os comandos de voo.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Air_Force

2.2.5 Prevenção da Desorientação Espacial

A aviação mundial reconhece o problema e mantém constante ação na área da prevenção, pois o número de ocorrências envolvendo desorientação espacial, como fator contribuinte ou causador, mais do que dobrou entre 1950 e 1990. Felizmente, o número total de ocorrências por milhão de horas voadas, vem decrescendo, o que significa que o esforço na área da prevenção tem sido efetivo (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

No Brasil, o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), órgão vinculado ao Estado-Maior do Comando da Aeronáutica (COMAER), vem estudando o assunto há diversas décadas e muito tem contribuído para a atividade de prevenção, tanto por investigar a fundo os acidentes quanto por propiciar uma melhor formação aos pilotos, a partir dos cursos regulares que são oferecidos, o que tem reforçado a segurança de vôo no país.

Mesmo com diversas iniciativas, cursos e treinamentos que buscam melhorar o desempenho dos pilotos, a ampla difusão do conhecimento a respeito da fisiologia envolvida na desorientação é fundamental, a partir de técnicas didáticas (BENSON, 1998).

Nesse sentido, a participação dos médicos de esquadrão da FAB e dos médicos de aviação das companhias aéreas, respectivamente, nos esquadrões de vôo e nas empresas de aviação, vem contribuindo sobremaneira para a prevenção da desorientação espacial na aviação brasileira. As atividades didáticas desenvolvidas por estes profissionais envolvem desde palestras locais (hangares, auditórios, salas de aula) até treinamentos fisiológicos orientados para os tripulantes.

O treinamento ideal consiste em trabalhar tanto com materiais e técnicas didáticas quanto em demonstração e prática (simuladores e dispositivos de treinamento), o que reforça, cada vez mais, a participação dos médicos com conhecimento em medicina aeroespacial atuando junto aos pilotos, tanto no âmbito civil quanto militar.

A engenharia aeronáutica também vem desenvolvendo uma série de dispositivos e equipamentos no sentido de prevenir situações que possam gerar ou contribuir para a desorientação espacial, a exemplo do *head-up display* (HUD), que concentra informações numa placa de vidro localizada próximo ao pára-brisa da aeronave. Este dispositivo minimiza movimentos de cabeça por parte do piloto em busca de informações principais relativas à altitude, velocidade, horizonte, dentre diversas outras (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.5.1 Simuladores de Vôo

A aviação mundial investe pesadamente em treinamento, sendo que os simuladores de vôo representam um grande avanço nesta área e proporcionam efetivo resultado quanto à prevenção (BENSON, 1998).

Um simulador de vôo pode variar, conceitualmente, desde um *software* para um computador pessoal (o *software Flight Simulator X* foi utilizado, por exemplo, neste trabalho) até um moderno e complexo sistema que executa todas as funções como se fosse uma aeronave, a partir da aplicação de recursos de engenharia mecânica, mecatrônica e robótica, como o *Desdemona*, considerado o simulador de vôo mais avançado do mundo.

Diversos avanços na engenharia propiciaram o desenvolvimento de simuladores, sendo que um dos modelos precursores dos modernos equipamentos foi o *Link Trainer*, criado por Edward Link, em 1929, nos Estados Unidos da América (EUA), atualmente exposto como peça de museu (Figura 70).



Figura 70 - Antigo simulador de voo.
Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety>

Há basicamente duas unidades que compõem um simulador de voo: a cabine (Figura 71) e a unidade de controle.



Figura 71 - Simulador de voo demonstrando a cabine.
Fonte: <http://www.faa.gov/pilots/safety>

Ainda que o custo desses modernos equipamentos possa ser elevado, as companhias aéreas, forças aéreas, centros de treinamento, dentre outras instituições, destinam cifras elevadíssimas para custear treinamento às equipagens em simuladores cada vez mais sofisticados, pois preferem este tipo de investimento a utilizar uma aeronave real para esta finalidade. Certamente, o custo do treinamento, por mais

elevado que possa ser não se compara à perda de uma aeronave em acidente, em função de deficiência de treinamento (BENSON, 1998).

Há diversos modelos e tipos no mercado, obviamente, com custo mais alto quanto mais recursos tecnológicos dispuser.

Os fabricantes de simuladores, usualmente, adquirem todo o conjunto de informações a respeito do envelope de operação de uma aeronave, bem como todas as fórmulas e equações que dizem respeito ao desempenho daquela aeronave em questão, de forma a poderem reproduzir, em modelos computadorizados, exatamente o comportamento da aeronave nas diversas situações de operação, bem como detalhando seus diversos sistemas: aeronavegabilidade, elétrico, hidráulico, informatizado, mecânico, dentre outros (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

A ergonomia reproduz todos os componentes da cabine da aeronave em questão, nos mínimos detalhes, pois todos os equipamentos de vôo, por exemplo, poderão ser os mesmos utilizados na aeronave de uso real. Da mesma forma, a aviônica pode ser a mesma empregada no modelo específico que se quer treinar.

Certamente, quanto mais completo e, conseqüentemente, mais complexo for o *cockpit* do simulador de Vôo, mais alto o custo de investimento e de manutenção do simulador (Figura 72).



Figura 72 - Moderno simulador de vôo.

Fonte: <http://www.revistamilitar.pt/modules/articles>

Desta forma, o piloto em treinamento, ao entrar na cabine de um simulador de última geração, poderá não conseguir estabelecer diferenças entre a cabine da aeronave real e uma cabine de treinamento, uma vez que esta conta com as mesmas poltronas, manetes, pedais, instrumentos e todos os demais recursos, comandos e botões de quaisquer painéis, a exemplo do que seria na aeronave adquirida para vôo (Figura 73).



Figura 73 - Cabine de vôo de um moderno simulador da NASA.
Fonte: <http://ffc.arc.nasa.gov/vms>

Modernos aplicativos e programas computacionais garantem uma diversidade quase sem limites no que diz respeito aos cenários e possibilidades de combinações de diferentes programações. O controle do simulador pode gerar diferentes mapas, rotas, relevos, cenários, pistas, aeroportos, além de outras aeronaves para interagir com aquela que está em instrução, inclusive colocando à disposição do aluno a plataforma de armas, no caso de uma aeronave militar.

O sistema de movimentação da cabine reproduz todos os movimentos e acelerações associados aos comandos dados na cabine, de forma a tornar possível provocar no piloto as mesmas sensações como se estivesse voando na aeronave. No caso de treinamento para prevenção de desorientação espacial, o simulador permite provocar no piloto as mesmas ilusões que teria em vôo, sejam visuais ou vestibulares, de acordo com a programação definida pelo instrutor e conforme os parâmetros possíveis para cada tipo de simulador. A NASA desenvolveu um moderno simulador de vôo, que possui uma cabine intercambiável, permitindo que sejam configurados diversos tipos de aeronave (Figura 74).



Figura 74 - Cabine intercambiável de vôo de um moderno simulador da NASA.
Fonte: <http://ffc.arc.nasa.gov/vms>

O sistema de projeção de imagens nos modernos simuladores conta com telas de alta resolução, sendo que a projeção pode ocorrer em telas como se fosse o campo visual do piloto numa cabine fechada ou em telas afastadas, no caso de simulador com cabine aberta.

O sistema de controle é a unidade em que atua o instrutor e representa a interface entre a máquina e o aluno. Dependendo do nível de sofisticação do simulador, o instrutor poderá ter à disposição todo o tipo de missão, sendo possível simular todo o tipo de pane (elétrica, hidráulica, fogo no motor, pane de motor nas diversas etapas do voo, decolagem de máximo desempenho, voo monomotor, dentre outras). Também é possível programar o simulador para criar condições meteorológicas diversas (noturno, diurno, com chuva, neve, tesoura de vento, dentre outras), além de ser possível desenvolver acelerações com grande carga G.

As aplicações de um simulador de voo são muitas, tanto na área de treinamento quanto de pesquisa, sendo inequívoco o custo-benefício. No entanto, em função do alto custo, muitas companhias e aeroclubes, por exemplo, não conseguem oferecer aos seus pilotos o mínimo necessário de prática de voo em simulador.

Dentre as utilizações do simulador, destacam-se:

- Complementação da formação do piloto durante os cursos de pilotagem;
- Recebimento de uma aeronave por ocasião da aquisição;
- Reciclagem e manutenção operacional das tripulações em procedimentos para enfrentamento de situações anormais em voo (repassar e permitir a prática das principais panes, por exemplo, falha do motor na decolagem, pane elétrica, pane hidráulica, dentre outras);
- Compor novas tripulações (por exemplo, um piloto mais experiente que nunca voou com um piloto mais novo e vice-versa);
- Testar novos equipamentos incorporados à aeronave (modernização de frota, novos sistemas de armas, nova aviônica);
- Testar novos acessórios disponibilizados aos pilotos e treinar antes de sua utilização real (óculos de visão noturna, por exemplo);
- Reconhecimento aéreo de áreas onde o piloto nunca voou (missões de reconhecimento, resgate, salvamento);
- Treinamento fisiológico na área da prevenção da desorientação espacial;
- Pesquisa na área da percepção humana do movimento.

O *Desdemonna* (*desorientation demonstrator*), por exemplo, em utilização na Holanda, reproduz quaisquer condições de voo com absoluta fidelidade ao que seria no voo real, em função de seu moderno sistema de articulações (Figura 75).

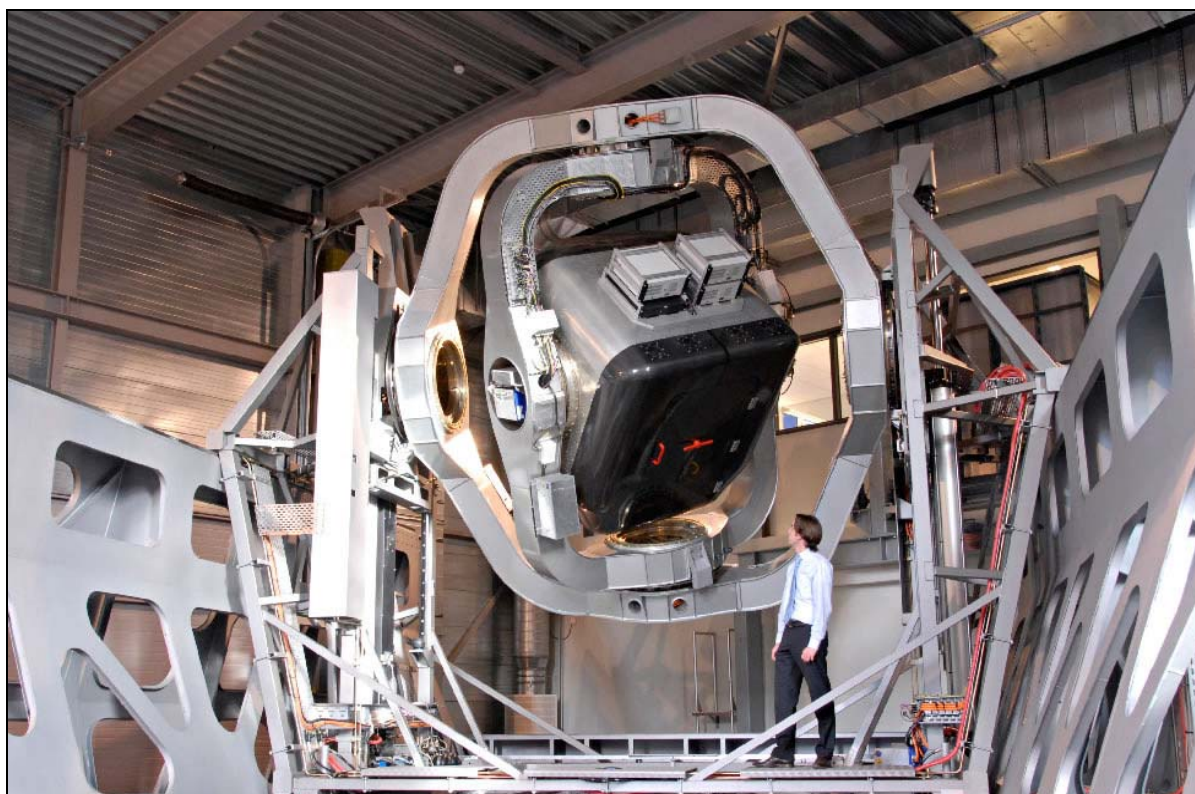


Figura 75 - Demonstrador de desorientação - *Desdemonna*.
Fonte: <http://www.tno.nl>

Desta forma, dispositivos que funcionam com base no conceito e utilizam alguns dos princípios dos simuladores de voo, a exemplo da Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada Aperfeiçoada, desenvolvida neste trabalho, podem representar uma alternativa de baixo custo e eficácia quanto a determinado tipo de treinamento, tanto em prol da prevenção da desorientação quanto para estudos e pesquisa.

2.2.5.2 Cadeira de Bárány

A Cadeira de Bárány foi desenvolvida pelo médico otologista Robert Bárány (Figura 76), que recebeu o prêmio Nobel em 1914 em função de estudos na área da fisiologia e patologia do sistema vestibular.

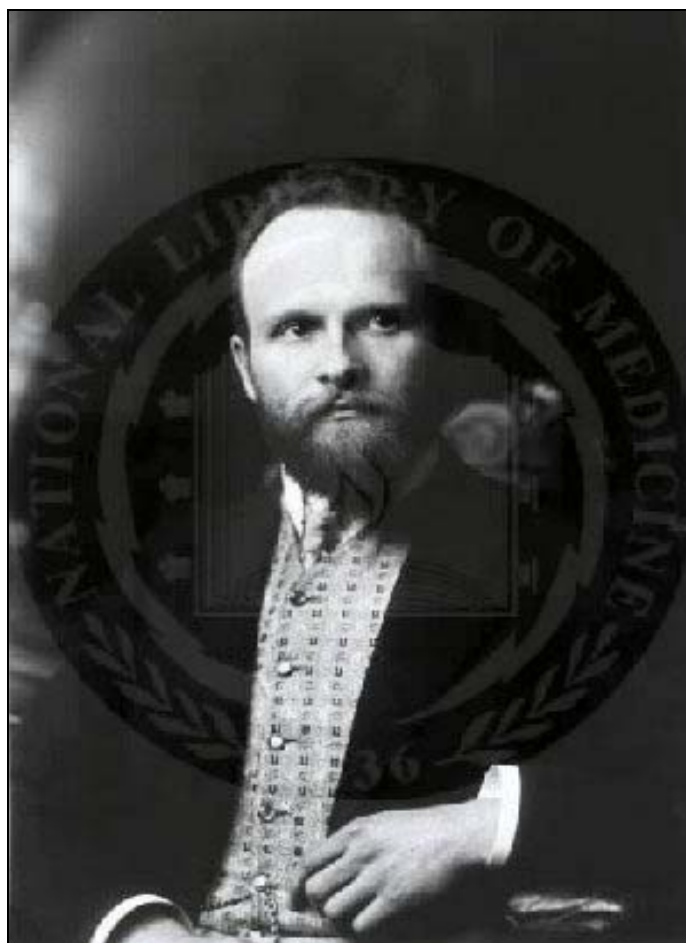


Figura 76 - Robert Bárány (1876 – 1936)
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Robert_Barany.jpg

O equipamento desenvolvido por Bárány pode ser considerado como o primeiro simulador específico para provocar estímulos capazes de desorientar o indivíduo, como se estivesse em vôo. Consiste de uma cadeira montada sobre um eixo rotatório, que proporciona movimento de rotação com o indivíduo sentado sobre ela, de

maneira a provocar estímulos decorrentes de alterações no fluxo da endolinfa dos canais circulares do sistema vestibular, a partir de uma aceleração inicial mantendo uma velocidade angular constante.

2.2.5.2.1 Aplicações da Cadeira Rotatória

Há diversas aplicações possíveis para a cadeira rotatória, que vão desde a realização de testes para avaliação de patologias e distúrbios vestibulares até demonstrações do fenômeno da desorientação espacial, sendo possível executar diferentes perfis para treinamento de pilotos, a partir da geração de ilusões provocadas, como: somatorrotatórias, oculogiratórias, somatogravitacionais, oculogravitacionais, dentre outras (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

A cadeira rotatória também tem sido utilizada em estudos relativos à cinetose em ambiente de microgravidade (RUSSOMANO et al., 2005a).

Certamente, uma das aplicações mais mencionadas é na área de treinamento de pilotos. A cadeira rotatória permite que em apenas alguns minutos de treinamento, o aluno experimente diversas sensações que o ajudarão, de forma decisiva, a melhor compreender e enfrentar um dos fenômenos que mais afeta a segurança de vôo – a desorientação espacial.

Demonstração da Ilusão Somatogiratória

Ao iniciar a rotação da cadeira, o indivíduo, com os olhos fechados, é perguntado a respeito da percepção do sentido da rotação, ao que sinaliza com os polegares, inclinando-os para o lado correspondente ao sentido da rotação percebida. Após alguns segundos (entre 10 a 20), em rotação com velocidade angular constante, o indivíduo deixa de perceber a rotação e sinaliza, com os polegares para cima, que cessou a sensação de rotação, apesar de a cadeira permanecer na mesma velocidade de rotação. Em seguida, então, o instrutor pára subitamente a rotação, ao que o aluno

indica, imediatamente, que a cadeira iniciou rotação para o outro lado, inclinando os polegares para o lado correspondente, confirmando a sensação. Neste momento, o instrutor solicita que o aluno abra os olhos, sendo que, extasiado, o aluno percebe que a cadeira se encontra parada e que ele estava, portanto, desorientado, a partir de uma ilusão somatogiratória (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Demonstração do Efeito de Coriolis

O aluno é colocado sentado na cadeira, sob rotação com velocidade angular constante e com os olhos fechados, sendo que, nesta demonstração, assume posição com a cabeça inclinada para frente, com a face para baixo. Após sinalizar, com os polegares para cima, indicando que a rotação cessou, o instrutor pára a cadeira solicitando que o aluno abra os olhos e movimente a cabeça para trás, simultaneamente.

O efeito provocado é tão exuberante que a sensação de rolamento a que é submetido o aluno pode vir acompanhada de nistagmo e de outros reflexos posturais (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.5.2.2 Fundamentos fisiológicos para realização de treinamento em cadeira rotatória

As sensações produzidas na cadeira em nada diferem das que ocorrem em vôo, o que reveste o invento de Bárány de um enorme potencial no campo do treinamento para demonstração da desorientação espacial, desde seus aspectos fisiológicos mais simples até a experimentação do fenômeno propriamente dito.

Em ambos os testes, como resultado final, resta inequívoca conclusão de que os sentidos humanos – sistema vestibular e proprioceptivo – não são capazes de garantir adequada orientação e equilíbrio ao piloto, em condições de escassas referências visuais, como num vôo por instrumentos.

Assim, de forma cabal, se demonstra ao aluno que os instrumentos do painel da aeronave representam a referência a ser seguida, quando houver conflito entre as informações provenientes dos diferentes sistemas – a desorientação espacial (GILLINGHAM; PREVIC, 1996). Reforça-se junto ao piloto em treinamento que, da mesma forma como aconteceu na cadeira rotatória, quando submetido a movimento (rotação) de velocidade angular constante em vôo, poderá experimentar a mesma sensação, quando deverá buscar a informação – quanto ao que realmente está acontecendo – nos instrumentos da aeronave, a fim de adotar medidas corretivas adequadas. O fechamento dos olhos nos testes tem o intuito de reproduzir a carência de informação visual durante o vôo, o que faz com que haja predomínio das informações vestibulares para estabelecer o equilíbrio e a orientação espacial, a partir de informações provenientes dos canais semicirculares.

A característica sensorial destes conjuntos de canais diz respeito à alta sensibilidade quanto a detectar acelerações, porém, baixa capacidade de perceber movimento (velocidade angular constante). Tal fenômeno ocorre em decorrência de uma inércia da endolinfa que difere da inércia do corpo do indivíduo, o que estimula os canais semicirculares de forma a produzir uma informação equivocada (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

2.2.5.2.3 Aperfeiçoamento da Cadeira de Bárány

A Cadeira de Bárány agrega simplicidade e funcionalidade, permitindo eficaz demonstração da incapacidade de os sentidos humanos, sem referências visuais adequadas, manterem o equilíbrio e a orientação espacial. Piedade, em 2001, desenvolveu uma cadeira rotatória eletricamente controlada (CREC) (Figura 77).



Figura 77 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC): desenvolvida por Piedade, em 2001, na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
Fonte: Piedade (2001)

Em 2005, a CREC foi modificada por Gessinger (Figura 78).



Figura 78 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC) modificada: desenvolvida por Gessinger, em 2005, na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
Fonte: Gessinger (2005)

Desta forma, o aperfeiçoamento da Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada proposto neste trabalho alinha-se ao propósito de permitir, além da quantificação da desorientação espacial, a aplicação do dispositivo nas áreas de ensino, de pesquisa e de prevenção da desorientação espacial, a partir de um modelo que seja de baixo custo e de alta eficácia, o que será demonstrado no capítulo a seguir.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho está dividido em três etapas, de acordo com a metodologia estabelecida:

- Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC): estudo do modelo desenvolvido por Piedade em 2001; aproveitamento da CREC modificada por Gessinger em 2005; desenvolvimento da CREC-Aperfeiçoada, como objeto de trabalho desta dissertação.
- Etapa II - Integração dos dispositivos e sistemas da Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap) com o computador;
- Etapa III - Testes com a CREC-Ap.

3.1 Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (CREC)

Esta etapa do trabalho está dividida em três fases, a fim de melhor caracterizar os diversos momentos em relação à CREC:

- Fase I - Aproveitamento da CREC desenvolvida por Piedade (2001);
- Fase II - Estudo e utilização da CREC modificada por Gessinger (2005);
- Fase III - Desenvolvimento da CREC-Ap.

3.1.1 Fase I - CREC desenvolvida por Piedade, em 2001

Em dezembro de 2001, o Engenheiro Piedade desenvolveu a CREC como objeto da Dissertação de Mestrado em Engenharia, na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, a partir da estrutura de uma antiga cadeira odontológica.

O modelo consistia de eixo rotatório em uma base robusta na qual foram adaptados os componentes do sistema do motor, com o objetivo de gerar o movimento da cadeira. Internamente, no eixo central, foi adaptado um par de rolamentos de encosto para diminuir o atrito e, conseqüentemente, reduzir o esforço do motor. Na região superior do eixo foi soldada uma chapa no topo, aparafusada ao assento da CREC. A extremidade inferior do eixo foi rotulada através de rolamento engastado dentro da base da CREC, o qual permite o livre giro do eixo e, conseqüentemente, da cadeira. Um apoio para a cabeça foi confeccionado em tubo galvanizado pintado, possuindo um anteparo semi-elíptico emborrachado em sua extremidade distal. Um apoio para os pés foi introduzido, tendo como objetivo evitar que os membros inferiores afetem o balanceamento dinâmico da CREC (Figura 79), fazendo o sistema girar excentricamente. Foi adicionado um cinto de segurança abdominal de dois pontos, semelhante ao utilizado pelo passageiro na aviação comercial.

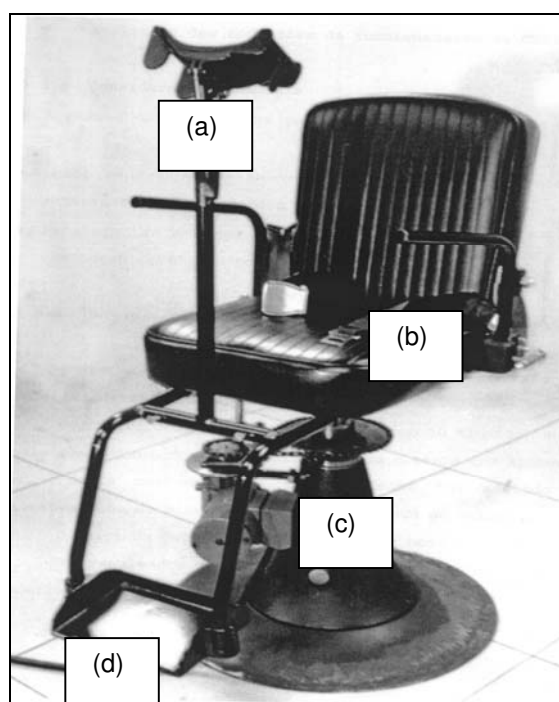


Figura 79 - CREC (Piedade): apoio para a cabeça (a); cinto de fixação de dois pontos (b); conjunto propulsor (c); apoio para os pés (d).

Fonte: Piedade (2001).

O conjunto propulsor contou com um motor elétrico de corrente contínua 24V, que apresentava uma rotação nominal de 3000 rotações por minuto (rpm). Com objetivo de aumentar o torque e diminuir a rotação foi usado um redutor com fator de redução de 15:1. A transmissão de movimento entre o motor e o eixo da CREC foi efetuada através de duas polias de canal trapezoidal e uma correia de perfil trapezoidal modelo "A29". A relação estabelecida entre a polia motora e a movida foi de 5:1, sendo o ajuste de tensão da correia feito através de furo oblongo.

A rotação final do sistema foi calculada pela expressão:

$$R_f = [(R_m/r) / R_p]$$

Onde:

R_f: rotação final;

R_m: rotação do motor;

r: fator do redutor;

R_p: relação das polias. Logo $R_f = (3000/15)/5$ – a rotação nominal é $R_f = 40,0$ rpm.

A rotação máxima de 40 rpm foi tida como satisfatória, pois os testes rotacionais em seres humanos são, em geral, realizados entre 10 e 35 rpm. O controle da rotação baseou-se em um circuito eletrônico com uma entrada de 220 Vca e uma saída ajustável de 24 Vcc. Assim, controlando-se a tensão de saída para o motor foi possível controlar a velocidade de rotação do mesmo, sendo a sua variação efetuada através de um circuito de PWM de 24V, modulado a 10Hz, com capacidade de disponibilizar até 10A e ajustado por um potenciômetro.

Um tacômetro digital foi desenvolvido com o objetivo de medir a velocidade da CREC em rotações por minuto (rpm). Este dispositivo consiste em um gerador (dínamo) que foi acoplado na relação de 1:1 ao eixo do motor da cadeira através de uma correia denteada. Desta forma, ao se girar o gerador, uma tensão foi induzida e, através de um microcontrolador 89C2051, o sinal foi adquirido, processado por um software em *Assembly* e indicado em dois blocos de *leds* de sete segmentos (Figura 80).



Figura 80 - Tacômetro digital.
Fonte: Piedade (2001).

As especificações finais da cadeira foram: patamar de rotação de 10-40 rpm, carga acidental máxima de 100 kg, tempo estimado de teste de 20-30 minutos e variação da aceleração no patamar teste 0 Rad/s².

3.1.2 Fase II - CREC modificada por Gessinger, em 2005

A CREC desenvolvida por Piedade (2001) sofreu modificações propostas pela médica Rosirene Pantaleão Gessinger, como tema de Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica, na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, em 2005 (Figura 81).



Figura 81 - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada (Gessinger):
modificada em 2005.

Fonte: Gessinger (2005).

Dentre as modificações realizadas na estrutura da CREC (Piedade, 2001), consta o desenvolvimento de uma base de madeira (Figura 82), a fim de permitir que o motor e a transmissão fiquem no interior desta, o que confere maior estabilidade e segurança, pois toda a parte elétrica e o sistema de polias ficaram protegidos dentro desta estrutura, inclusive, propiciando maior isolamento acústico.

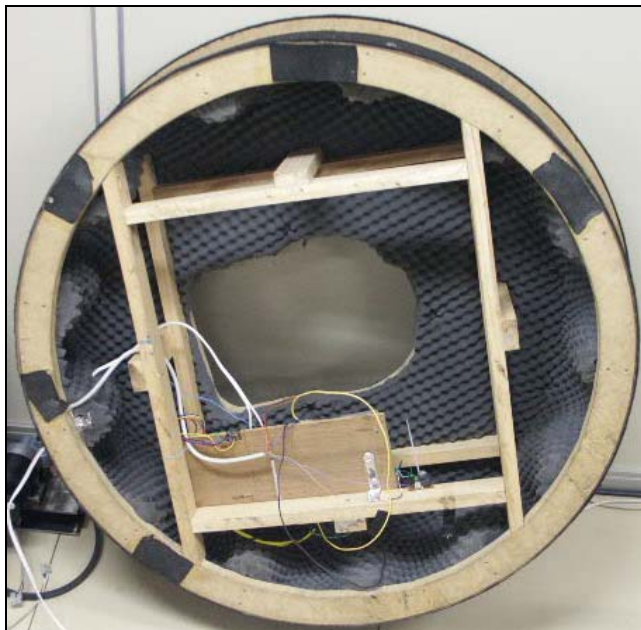


Figura 82 - Base da CREC (vista interna): em madeira.
Fonte: Gessinger (2005).

A base possui um diâmetro de 970 mm e altura de 250 mm, sendo que sua superfície externa foi revestida com forração automotiva (Figura 83).



Figura 83 - Base da CREC (vista externa): superfície
externa recoberta por forração automotiva.
Fonte: Gessinger (2005).

Um melhor isolamento acústico foi possível a partir do revestimento do interior da base com espuma acústica de densidade 20 (D 20), com 3 cm de espessura (2 cm de base e 1 cm de mamilo), o que reduziu a percepção do ruído do motor de transmissão, minimizando a interferência do som como referência acústica para indicação do movimento da cadeira, o que poderia se tornar um fator de orientação espacial (Figura 84).



Figura 84 - Revestimento de espuma no interior da base da cadeira.
Fonte: Gessinger (2005).

Outra modificação foi a introdução de um mecanismo para movimentação do espaldar da cadeira e tornar possível a sua angulação. Para tanto, foi utilizada uma trava dentada de segurança de aço 1020 escalonada em intervalos de 15° , de 90° a 0° (posição supina) (Figura 85).



Figura 85 - Trava dentada de aço 1020.
Fonte: Gessinger (2005).

O sistema de trava dentada foi fixado nos dois lados do assento proporcionando maior estabilidade e segurança, sendo utilizado um pino de aço de cada lado do espaldar da cadeira, que se encaixa no dente da trava, determinando assim o ângulo (Figura 86).

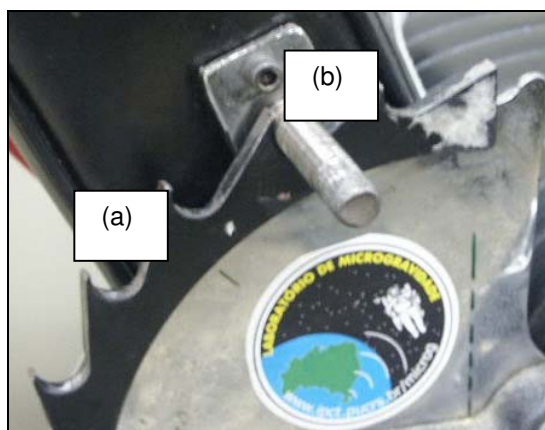


Figura 86 - Sistema de trava: trava dentada (a) com pino de aço (b).

Fonte: Gessinger (2005).

Este sistema permite selecionar o ângulo desejado com segurança para realização de estudos, como por exemplo, a 90° (Figura 87) ou a 0° (Figura 88).



Figura 87 - Angulação do encosto a 90°.
Fonte: Gessinger (2005).



Figura 88 - Angulação do encosto a 0°.
Fonte: Gessinger (2005).

Para apoiar os membros inferiores foi confeccionado um apoio que se encaixa na base do assento, a fim de ser utilizado em experimentos com o indivíduo na posição supina. Este apoio foi confeccionado com uma estrutura de dois tubos de aço 1045 medindo 1220 mm de comprimento com um espaço entre eles de 300 mm e madeira revestida de espuma recoberta por uma capa de material sintético (Figura 89).

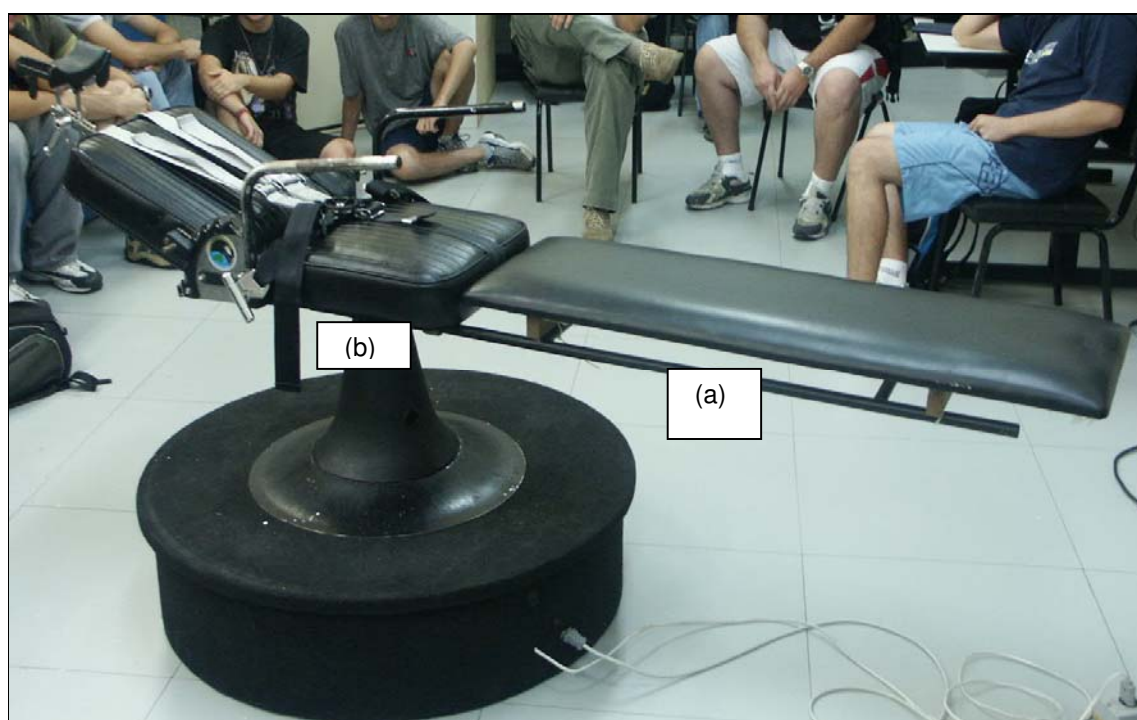


Figura 89 - Apoio para membros inferiores: estrutura tubular (a) encaixado na base do assento (b), para experimento em posição supina.
Fonte: Gessinger (2005).

O sistema de fixação com cinto de segurança abdominal de dois pontos foi substituído por um de cinco pontos (Figura 90), similares aos utilizados por pilotos na aviação, objetivando manter o indivíduo estável durante os testes, independentemente da angulação utilizada, aumentando assim o conforto e a segurança.



Figura 90 - Cinto de segurança de cinco pontos: (a), (b), (c), (d) e (e) que proporciona maior segurança e conforto para a realização dos testes.

Fonte: Gessinger (2005).

3.1.3 Fase III - Desenvolvimento da CREC-Aperfeiçoada

Esta fase do projeto foi desenvolvida em etapas, detalhadas a seguir, sendo que, inicialmente, um estudo para aperfeiçoamento da cadeira foi realizado com base na CREC modificada por Gessinger, em 2005.

Em seqüência, com base nos apontamentos obtidos no estudo inicial, foram incorporados certos dispositivos e diversos componentes (estruturais, mecânicos, elétricos, eletrônicos, informatizados) desenvolvidos especificamente para o propósito deste trabalho ou adaptados a partir de soluções preexistentes no mercado, sendo os seguintes:

- Estrutura em alumínio;
- Estrutura em aço;
- Estrutura em MDF para apoio das pernas;
- Estrutura para apoio dos pés;
- Cobertura em tecido;
- Sistema de freio hidráulico;
- Manche de comando de vôo (*joystick*);
- Aplicativo para quantificação da desorientação espacial;
- Microcâmera infravermelho e unidade transmissora VHF;
- Sistema HUB USB sem fio;
- Monitor de vídeo LCD de 19 polegadas;
- Dispositivo com expensor de portas USB;
- *Software* de Simulador de Vôo (*Flight Simulator X*);
- Conector rotativo para alimentação elétrica;
- Régua de distribuição de energia elétrica.

O ponto de partida deste projeto foi um estudo detalhado dos diversos componentes da CREC modificada por Gessinger, em 2005 (Figura 91).

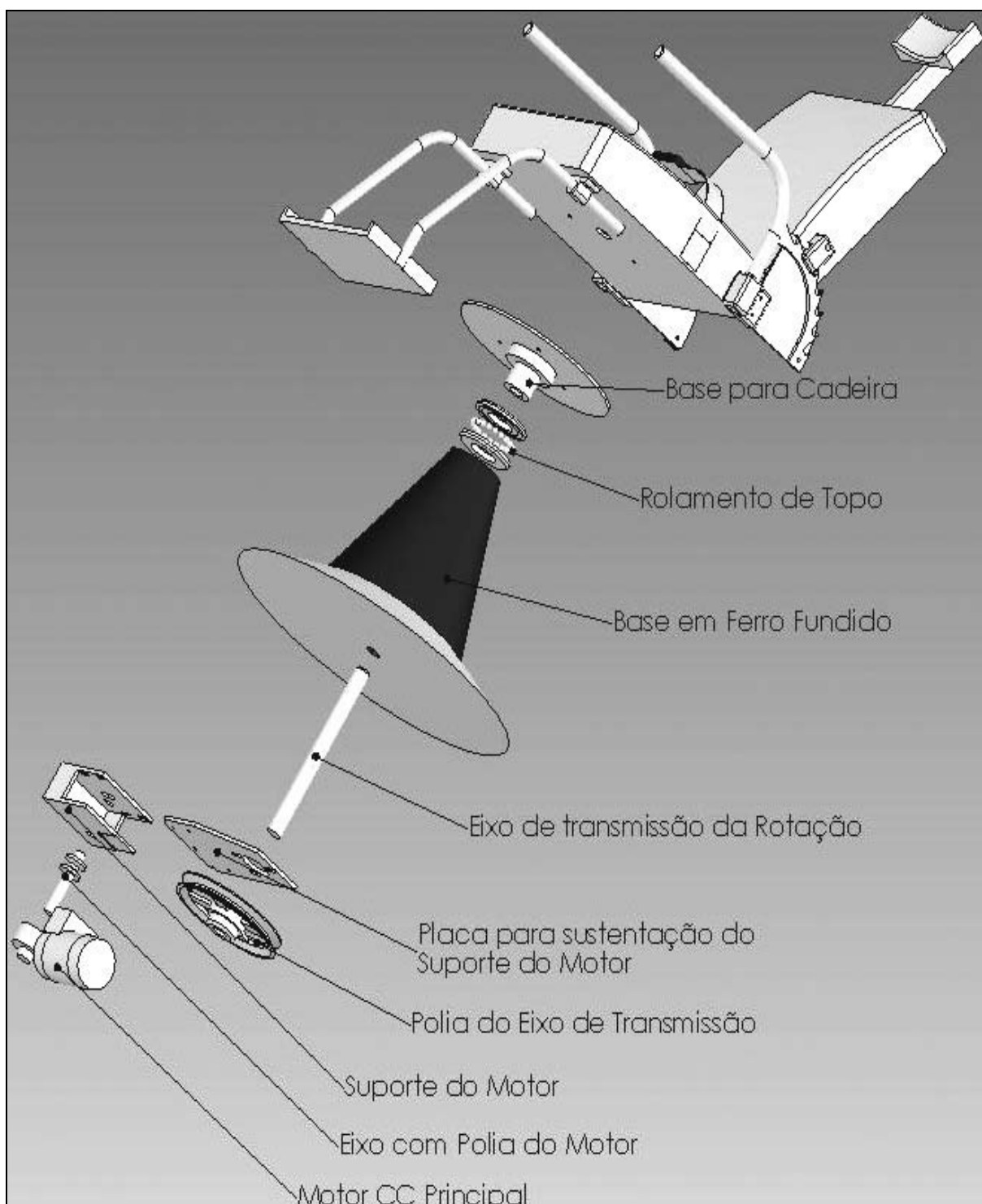


Figura 91 - Estrutura detalhada da CREC separada por componentes.
Fonte: http://www.sbeb.org.br/rbeb/artigos/rev21/n2-3/art-c_21_2-3.pdf

Após análise pormenorizada da CREC modificada por Gessinger (2005), optou-se pelo aproveitamento dos seguintes sistemas e dispositivos:

- estrutura propriamente dita constando de encosto, assento, cone de sustentação, base em madeira, dispositivos laterais de fixação e angulação do espaldar e conexão para alimentação de energia elétrica com a rede;
- conjunto propulsor;
- sistema de tração;
- sistema de controle de rotação (tacômetro);
- sistema de fixação lateral do apoio para antebraços;
- cinto de segurança de cinco pontos.

Assim, tendo-se definido quais os sistemas e dispositivos que seriam aproveitados, iniciou-se o planejamento para escolha dos diversos componentes e materiais que serviriam como base para este trabalho, ou seja, o desenvolvimento de um sistema de quantificação para desorientação espacial, a partir da CREC.

Inicialmente, diversas projeções e ensaios foram feitos em termos de estrutura, a fim de se ter a exata dimensão de tudo o que seria necessário para viabilizar o projeto, considerando-se, também, a relação custo-benefício, em função da restrição de recursos financeiros.

Ao término de todas essas verificações e análises, iniciou-se a confecção e desenvolvimento de estruturas e componentes, dando origem à Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada - Aperfeiçoada (CREC-Ap), cujos sistemas foram integrados ao computador (Etapa II), a fim de que fossem executados os testes necessários (Etapa III).

3.1.3.1 Estrutura em alumínio

A fim de recriar um ambiente semelhante ao de um *cockpit* e proporcionar sustentação à cobertura do sistema, foi desenvolvida uma estrutura de alumínio, utilizando-se barras tubulares (19 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura).

A escolha dos tubos de alumínio se deu em virtude do baixo custo, facilidade de manuseio para dobragem, leveza e rigidez suficiente para suportar a cobertura. O processo de confecção da estrutura envolveu a dobragem das barras em um torno manual, a partir de desenho específico, de acordo com as referências obtidas no trabalho de campo realizado nas aeronaves do Esquadrão PAMPA, na BACO.

Assim, as medidas internas obtidas na nacele de uma aeronave F-5 M Tiger II (Figura 92), da Força Aérea Brasileira, serviram como referência à confecção da estrutura de alumínio que dá forma à CREC-Ap. Ressalta-se que a coleta de dados seguiu as normas estipuladas pela Aeronáutica, em atenção aos Regulamentos daquela instituição. As medidas foram utilizadas de forma aproximada, apenas para recriar na CREC-Ap as melhores condições possíveis à ambientação do piloto. Todos os dados coletados e imagens utilizadas são de caráter ostensivo.

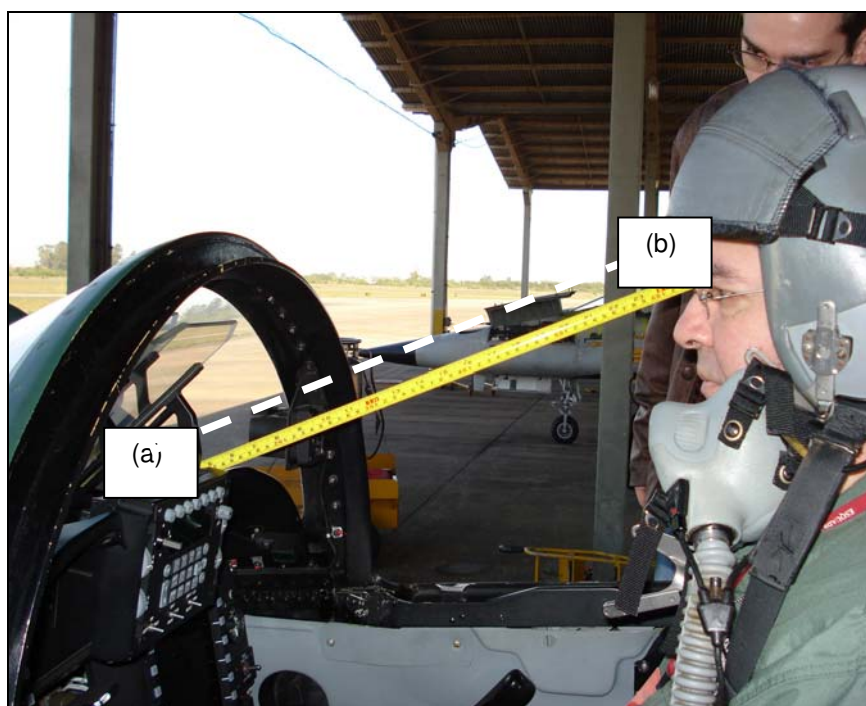


Figura 92 - Verificação das dimensões da nacele: coleta das medidas internas do *cockpit* da aeronave F-5 M do 1º/14º Grupo de Aviação (Esquadrão PAMPA), na BACO. A confecção da estrutura em alumínio seguiu as referências (a) e (b), conforme exemplo destacado na linha pontilhada (70 cm) acima da fita métrica, de forma aproximada. Major Médico CLOER dentro do *cockpit* do F-5 M.

Fonte: O autor (2007).

O sistema de fixação dos apoios para antebraços, no projeto de Gessinger (2005), situado na lateral da CREC, um de cada lado, foi aproveitado para fixar os tubos de alumínio, de forma a encaixá-los, perfeitamente, firmando-os por meio de parafuso com borboleta. As extremidades dos tubos próximas aos pés se encaixam numa estrutura de aço tubular, também desenvolvida neste projeto, tanto para esta finalidade quanto para suportar outros componentes incorporados à CREC-Ap (Figura 93).

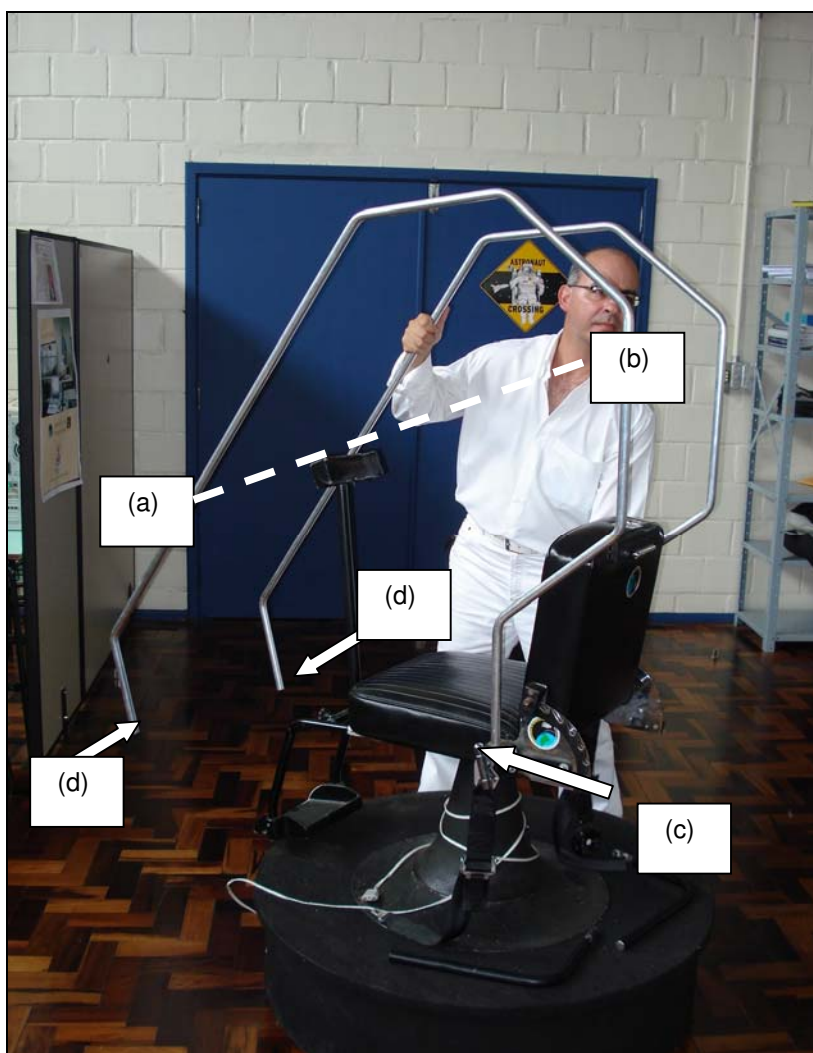


Figura 93 - Estrutura de tubos de alumínio: a linha pontilhada, com aproximadamente 70 cm entre (a) e (b), mostra a distância entre a cabeça do piloto e o painel; encaixe das extremidades da estrutura de alumínio na lateral da cadeira com fixação por parafuso (c); extremidades que encaixam na barra de aço tubular de apoio aos pés (d).

Fonte: O autor (2007).

3.1.3.2 Estrutura em aço

Uma estrutura em tubos de aço (19 mm de diâmetro externo e 2 mm de espessura) foi desenvolvida para servir de arcabouço e suportar alguns componentes, além de permitir a fixação da estrutura de alumínio, na parte inferior frontal, junto ao apoio para os pés.

A escolha em relação ao aço foi em função da resistência, sendo que a estrutura consta do seguinte: na parte frontal, dois tubos retos de aço, inclinados para frente e para baixo, com ângulo divergente entre si, a partir das extremidades superiores, onde estão soldados à placa disposta verticalmente; esta mesma placa vertical serve para fixar o monitor LCD; um sistema de engate fixado entre os dois tubos da parte frontal; uma placa horizontal, ao centro, para apoiar o manche; um tubo transversal, na parte inferior, para apoio dos tubos da parte frontal, dos tubos da parte inferior, fixação da estrutura de madeira de apoio aos pés e fixação das extremidades da estrutura de tubos de alumínio; dois tubos verticais para sustentar o sistema de engate e a placa horizontal; três pares de tubos de diferentes tamanhos, dispostos horizontalmente, paralelos entre si, e unidos por segmentos de tubos em formato semilunar; três pequenos tubos para fixação da placa horizontal; dois pares de interseções de formato semilunar. Um sistema de engate que une os dois tubos inclinados da parte frontal foi desenvolvido para permitir o deslocamento do conjunto à frente, a fim de permitir acesso mais fácil para o piloto.

As extremidades inferiores dos tubos frontais estão apoiadas na barra tubular transversal, por engate móvel.

A estrutura em aço está acoplada à base do assento e à estrutura de alumínio, sendo esta fixada também às laterais da CREC-Ap. (Figura 94).

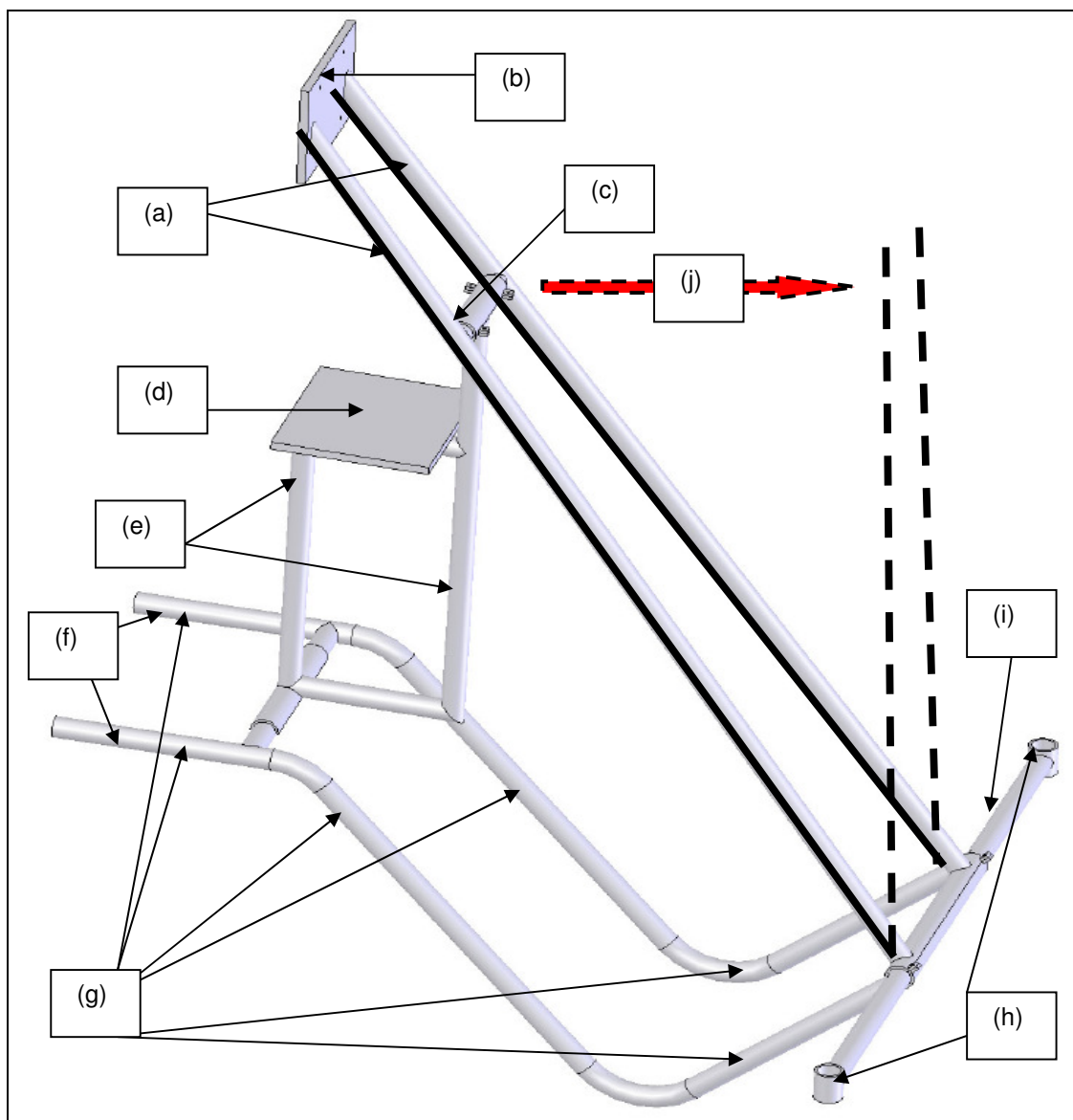


Figura 94 - Estrutura de tubos de aço: os tubos da parte frontal (a); placa vertical de fixação do monitor LCD (b); sistema de engate (c); placa horizontal para apoio do manche (d); tubos verticais de sustentação da placa horizontal e do sistema de engate (e); tubos de fixação da estrutura à base da cadeira (f); tubos da parte inferior (g); encaixes para as extremidades da estrutura de alumínio (h); tubo transversal (i); seta pontilhada e linhas pontilhadas indicando o sentido do movimento de bascula do conjunto frontal (j).

Fonte: Desenho desenvolvido pelo Engenheiro Felipe Prehn Falcão (2007).

3.1.3.3 Estrutura para apoio das pernas

Uma estrutura em MDF foi necessária para apoiar as pernas, a fim de proporcionar maior firmeza e estabilidade para os membros inferiores, que passaram a apoiar-se tanto nas plantas dos pés quanto nas panturrilhas (Figura 95).

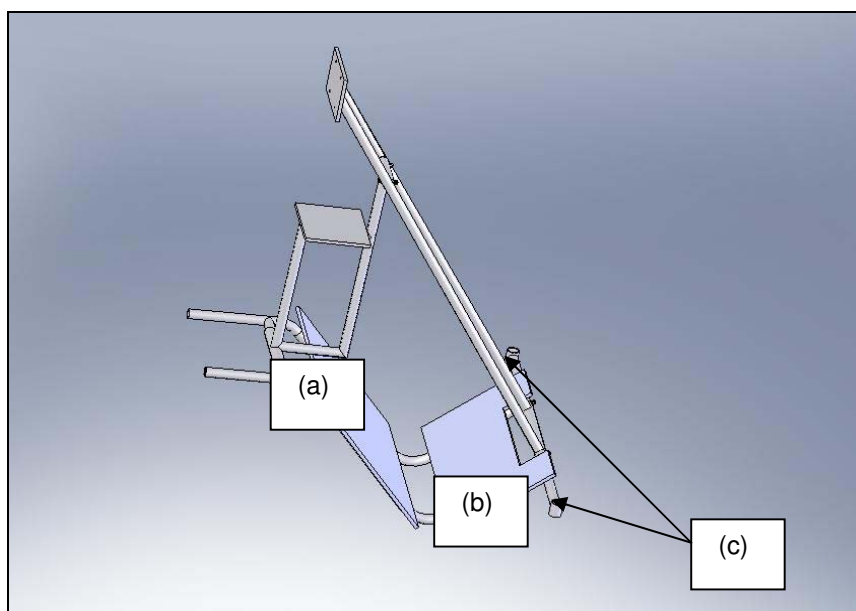


Figura 95 - Estrutura da parte frontal inferior (pernas): estrutura em MDF para apoio das pernas com fixação por parafusos aos tubos de aço (a); estrutura em MDF para apoio dos pés com fixação por parafusos aos tubos de aço (b); encaixe para os tubos de alumínio nos soquetes do tubo transversal da estrutura de aço (c).

Fonte: Desenho desenvolvido pelo Engenheiro Felipe Prehn Falcão (2007).

3.1.3.4 Estrutura para apoio dos pés

Uma estrutura de apoio aos pés foi confeccionada em MDF (8 mm), fixada por parafusos ao tubo transversal e revestida com lâmina de borracha antiderrapante na cor preta (Figura 96).

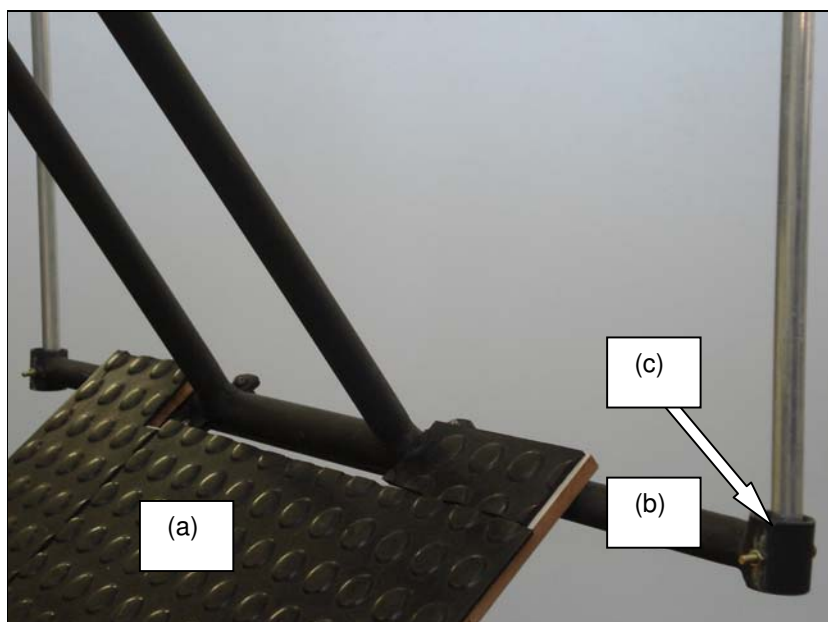


Figura 96 - Estrutura da parte frontal inferior (pés): estrutura em madeira para apoio aos pés revestida por lâmina de borracha antiderrapante (a); tubo transversal (b); encaixe dos tubos de alumínio nos soquetes da estrutura de aço com fixação por parafusos (c).

Fonte: O autor (2007)

3.1.3.5 Cobertura

A cobertura foi confeccionada em curvim emborrachado (*blackout*), na cor bege, e objetiva minimizar a influência do meio externo (som, ar e, principalmente, luminosidade), além de simular um *cockpit*, com dimensões aproximadas às da aeronave F-5 M. As costuras foram feitas seguindo o contorno dos tubos de alumínio que sustentam a referida cobertura; a parte de baixo foi fechada com botões de pressão junto à base do assento. A fim de permitir a entrada do indivíduo no interior da estrutura, foi projetada uma abertura com zíper, do lado esquerdo da CREC-Ap. Um molde em brim foi confeccionado previamente como modelo para testes e ajustes nas costuras (Figura 97).



Figura 97 - Vista frontal da cobertura: molde de tecido (brim) da cobertura da CREC-Ap.
Fonte: O autor (2008).

3.1.3.6 Sistema de freio hidráulico

A incorporação de um sistema de freio hidráulico se deu a partir da adaptação de um conjunto de freio de motocicleta, permitindo a parada instantânea da cadeira nas diferentes etapas do experimento, além de proporcionar maior precisão neste procedimento. A fim de assegurar o necessário afastamento do operador em relação à CREC-Ap, por questão de segurança, utilizou-se uma extensão de mangueira de pressão para fluido hidráulico, de maneira a permitir o acionamento do freio à maior distância (Figura 98).

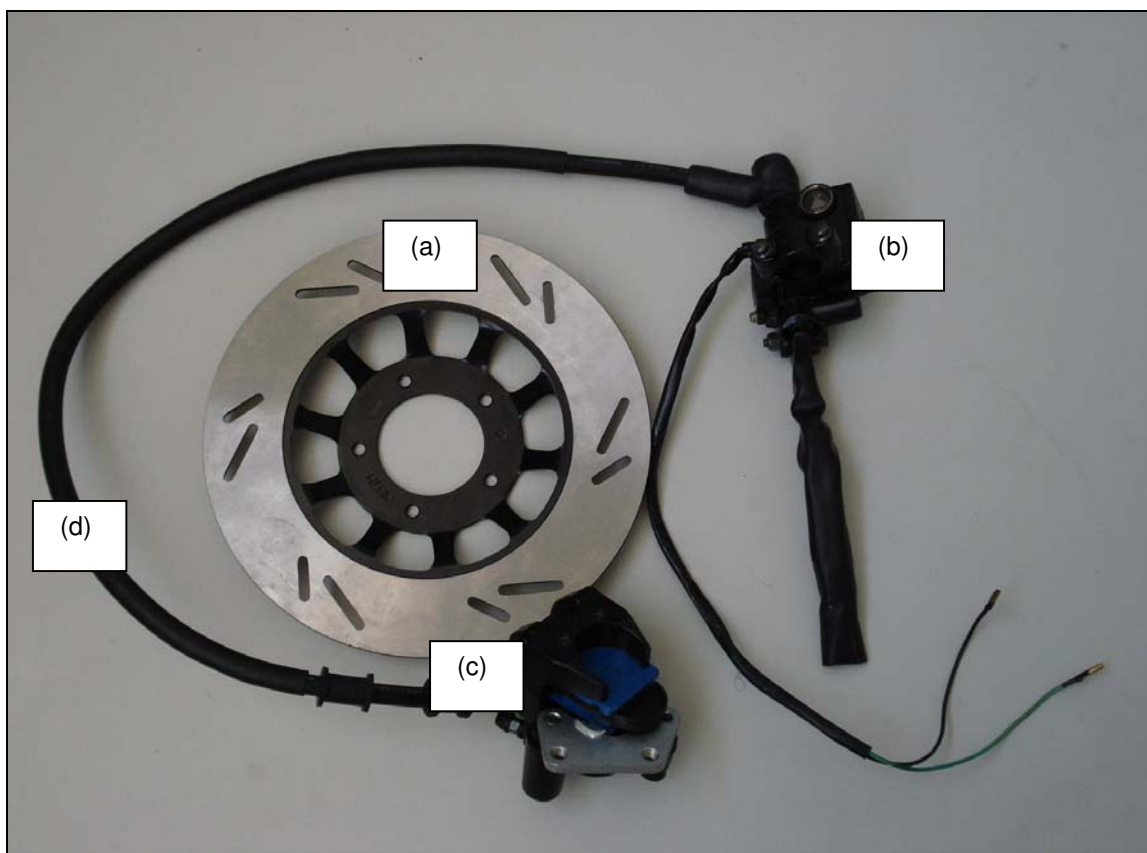


Figura 98 - Sistema de freio de motocicleta adaptado à CREC-Ap: disco de freio (a); reservatório de fluido hidráulico (b); conjunto de pinça e pastilha de freio (c); mangueira de fluido hidráulico (d).

Fonte: O autor (2007).

Um pedal foi adaptado permitindo o acionamento mecânico do conjunto de freio, a partir de um pino metálico (atuador) que pressiona a entrada do reservatório de fluido hidráulico. Este está fixado a um tubo metálico (como se fosse um punho do guidão) preso a um bloco de plástico que o conecta ao pedal. A fixação do pedal à placa se dá por parafusos. O pedal dispõe de dois apoios laterais de metal que permitem a fixação do sistema a uma base fixa para evitar deslizamentos no momento do acionamento do freio (Figura 99).

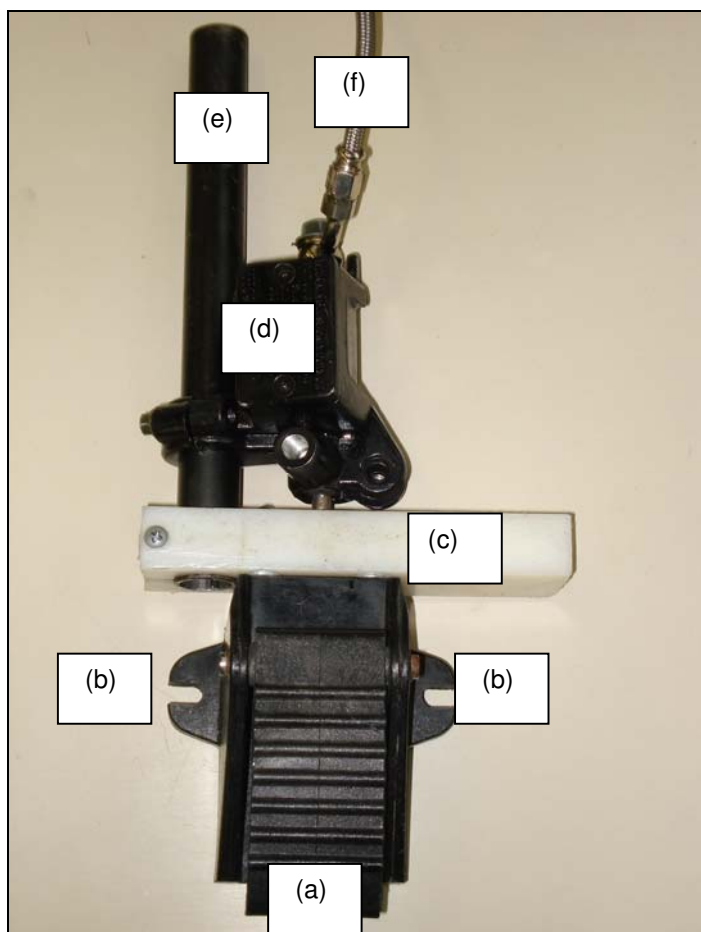


Figura 99 - Detalhes do conjunto de acionamento do freio: pedal (a); aletas para fixação do pedal (b); bloco de plástico fixando o pedal ao punho (c); reservatório de fluido hidráulico (d); tubo metálico de fixação do reservatório (e); mangueira de fluido hidráulico (f).

Fonte: O autor (2007).

O disco de freio e a pinça foram instalados abaixo do assento, considerando-se: fácil acesso para manutenção, melhor possibilidade de fixação do conjunto e melhor distribuição do peso. O conjunto fica protegido tanto pelo disco metálico de maior diâmetro que suporta o assento da cadeira, quanto pela própria base do assento acima. A mangueira de pressão que conecta o reservatório de fluido à pinça de freio entra por um orifício na base de madeira e passa por dentro do cone de sustentação, saindo por um orifício lateral para alcançar a pinça de freio. (Figura 100).

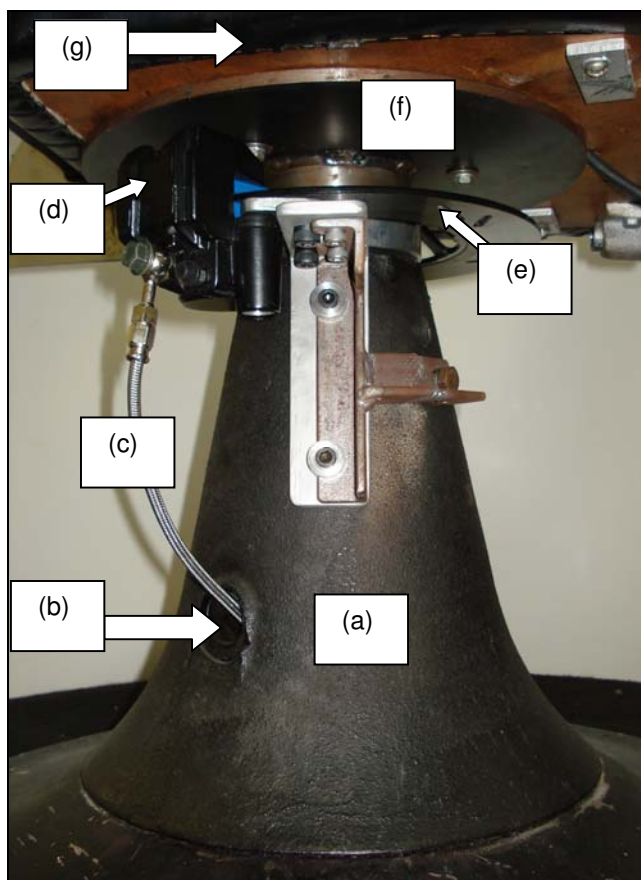


Figura 100 - Instalação do conjunto de freio: cone de sustentação (a); orifício lateral (b); mangueira de fluido hidráulico (c); conjunto de pinça e pastilha (d); disco de freio (e); disco metálico da base do assento (f); base do assento (g).

Fonte: O autor (2007).

Para fixar o conjunto de pinça e pastilha à cadeira foram desenvolvidas duas peças: uma de alumínio, em formato de “L”, colocada de forma invertida, com fixação vertical; outra, de ferro, em formato de “T”, com fixação vertical e horizontal. A peça em “T” acompanha a curvatura do cone. Esta peça está colocada de forma justaposta, por cima da peça em “L”, sendo que ambas são fixadas ao cone por parafusos. A peça em “L” fixa o conjunto de pinça e pastilha; a peça em “T” reforça a fixação da peça em “L” ao cone (Figura 101).

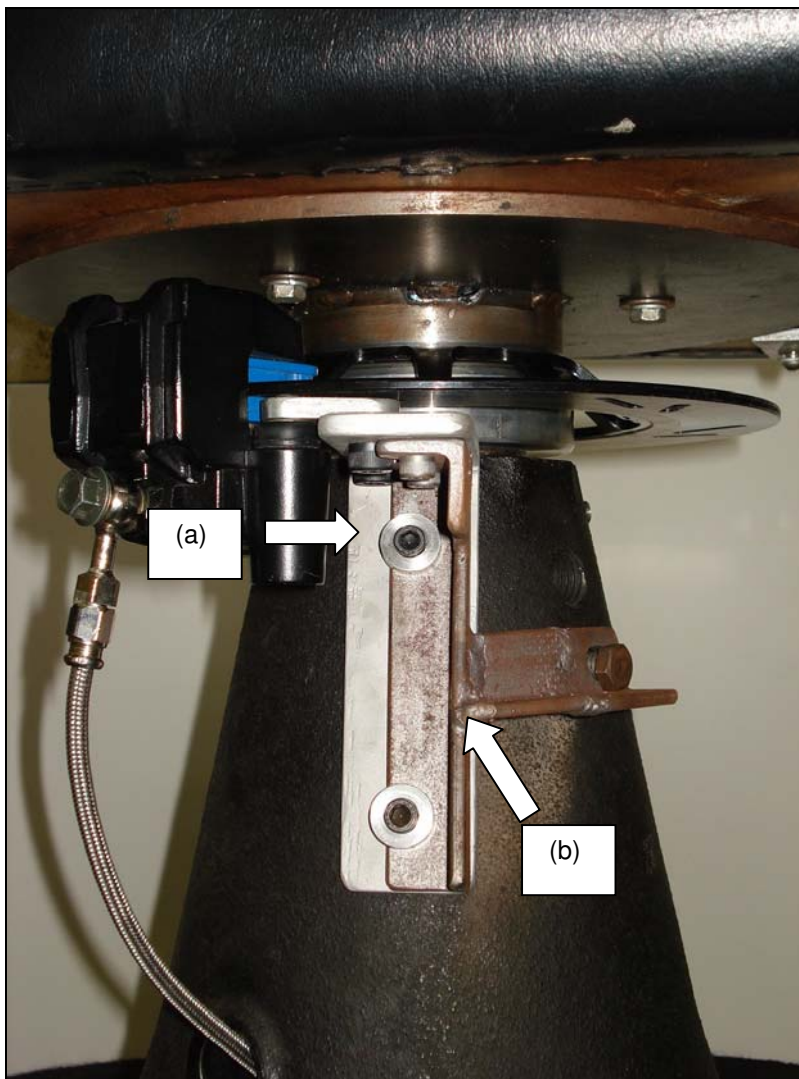


Figura 101 - Peças metálicas de fixação em formato de “L” e em “T”: peça em “L” (alumínio) fixando a pinça ao cone (a); peça em “T” (ferro) justaposta e reforçando a fixação da peça em “L” ao cone, por meio de três pontos de fixação (b).

Fonte: O autor (2007).

O disco de freio é fixado ao eixo de rotação, no topo cone, logo abaixo do disco metálico da base da cadeira (Figura 102).

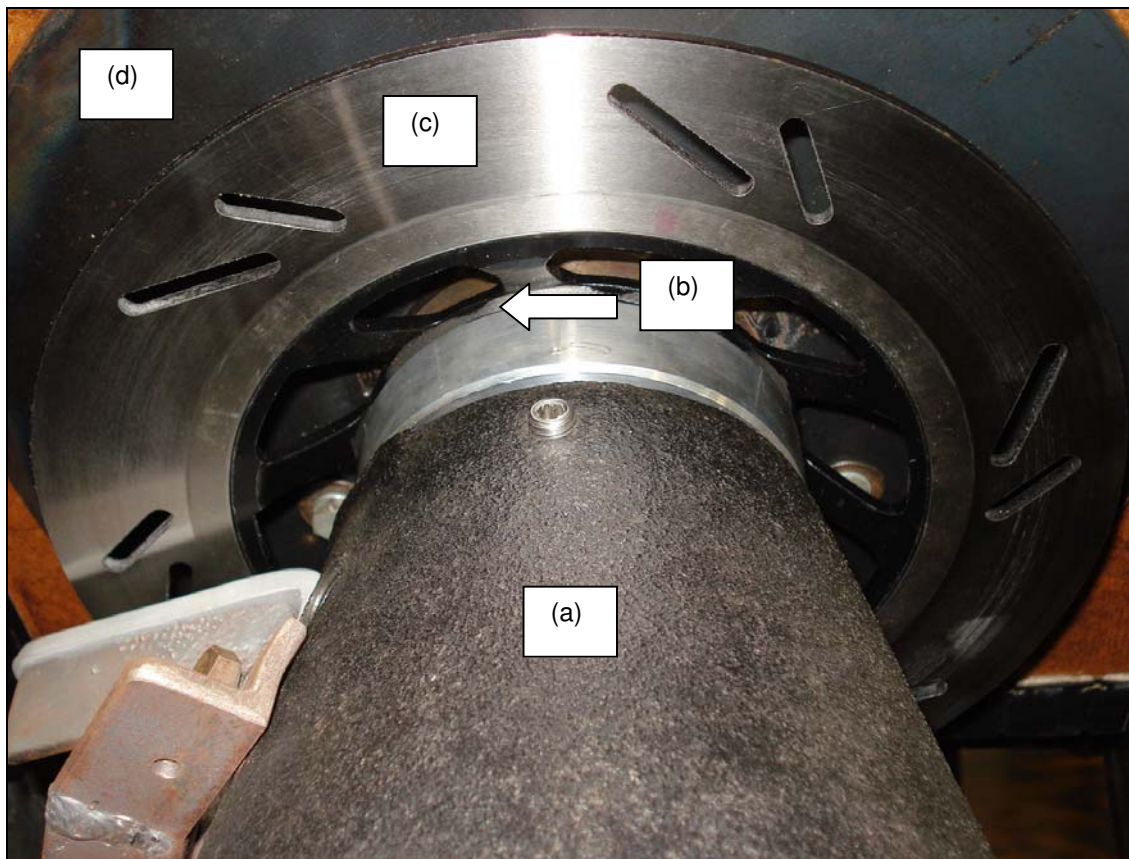


Figura 102 - Detalhe de fixação do disco de freio ao eixo da CREC-Ap: cone de sustentação da cadeira (a); fixação do disco de freio no topo do cone (b); disco de freio (c); disco metálico da base do assento (d).

Fonte: O autor (2007).

3.1.3.7 Manche do comando de voo

A ilustração de uma maquete, do inglês, *mock-up*, da cabine de um F-5 M obtida em uma revista de aeronáutica foi utilizada como referência na escolha de um *joystick* para simular o manche da aeronave (Figuras 103 e 104).

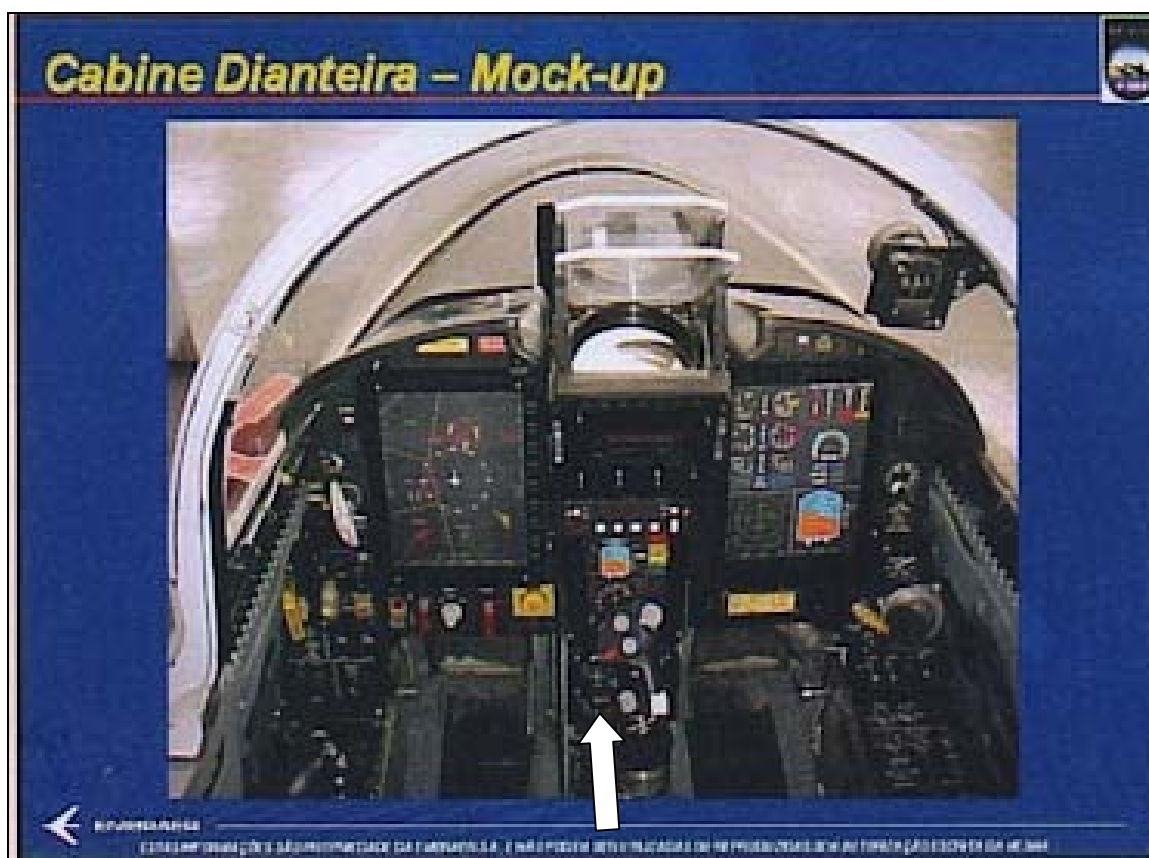


Figura 103 – Maquete (*Mock-up*) da cabine da aeronave F-5 M da FAB.
 Fonte: Revista Albatroz (2007).



Figura 104 - Detalhe do manche da aeronave F-5 M.
 Fonte: Revista Albatroz (2007).

O *joystick* apresenta semelhança com o manche da aeronave F-5 cumprindo assim a finalidade desejada, tendo sido escolhido o *joystick* Genius MaxFighter F-16U, com interface USB, como a mais adequada solução encontrada, considerando-se a relação custo-benefício (Figura 105). O *joystick* possui contorno ergonômico, dispendo de três botões ao alcance do dedo polegar e um gatilho ao alcance do dedo indicador. A localização e altura de fixação do *joystick* na placa horizontal da estrutura de aço foram definidas de acordo com as medidas obtidas na própria aeronave e conforme o modelo obtido no *mock-up*.

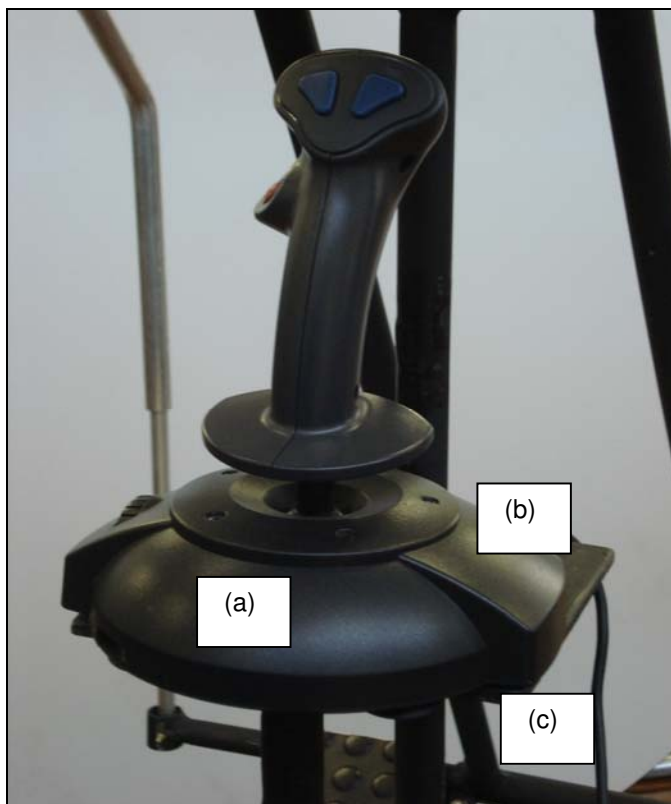


Figura 105 - Detalhes do manche e instalação: *joystick* simulando manche de uma aeronave F-5 (a); placa horizontal onde está fixado o joystick por um sistema de ventosas na base reforçado por um parafuso (b); cabo de saída com interface USB (c).

Fonte: O autor (2007).

3.1.3.8 Aplicativo para quantificação da desorientação espacial

O aplicativo desenvolvido especificamente para este trabalho foi denominado *Flight Capture* e tem como objetivo capturar e armazenar os movimentos realizados pelo piloto no manche durante a experimentação, da mesma forma que um *joystick* comum durante a utilização de um *videogame*. No caso deste trabalho, o *joystick* substituiu o manche e foi utilizado o *Flight Simulator X*, da Microsoft® para gerar os cenários de vôo.

O *Flight Capture* foi desenvolvido em *delphi* usando-se o compilador da Borland - Delphi 7. Também foi utilizado o componente de controle *ActiveX freeware DelphiX*, para possibilitar a comunicação através da porta USB do computador.

Desta forma, foi possível obter-se uma amostragem de aproximadamente 50 capturas por segundo. Como a utilização é simultânea com o *Flight Simulator*, o programa foi desenvolvido de forma a não precisar estar ativo, ou seja, com sua janela em primeiro plano, para conseguir capturar os dados.

Como funcionalidade, destaca-se que é possível, através da tela de configurações, selecionar a função de cada botão e também o limite máximo de movimento (calibragem) que se consegue alcançar nos eixos x e y, em graus. Faz-se necessário informar esses dados apenas uma vez, pois o programa gera o arquivo "configuracoes.ini", que é salvo automaticamente. Quando o programa é iniciado as configurações são buscadas nesse arquivo.

Após a gravação, é gerado um arquivo no formato texto (Figura 106), em que consta a configuração dos botões, e também todos os pontos capturados, de acordo com o seguinte formato (as variáveis estão separadas por tabulação):

eixo_x eixo_y throttle botao_1 botao_2 botao_3 botao_4 tempo

1	1							
2	0							
3	3							
4	2							
5	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.109
6	1.8	-0.9	11	1	1	1	1	0.125
7	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.140
8	0.3	-0.9	11	1	1	1	1	0.156
9	1.2	-0.9	11	1	1	1	1	0.172
10	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.187
11	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.203
12	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.218
13	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.234
14	0.9	-0.9	11	1	1	1	1	0.250

Figura 106 - Imagem com *print screen* da tela: arquivo “txt” gerado pela captura.
Fonte: O autor (2007).

No exemplo acima (Figura 106), percebe-se que as quatro primeiras linhas destinam-se às funções dos botões 1, 2, 3 e 4, respectivamente; após isso, iniciam-se as linhas de captura. Nota-se, também, que a linha 6 representa: eixo_x = 1.8; eixo_y = -0.9; *throttle* = 11; botao_1 = solto; e assim por diante. Os eixos x e y são salvos em graus, a potência (*throttle*) varia de 0 a 100%, os botões apresentam como resultado “1” se não estiverem sendo pressionados e “0” se forem pressionados; o tempo é contado em segundos.

A tela principal do *Flight Capture* (Figura 107) pode ser dividida em duas partes: o controle (pontos 1, 2, 3, 4 e 5) onde o usuário pode acessar todas as funcionalidades do programa; e o *display* (pontos 6, 7, 8, e 9), que é utilizado para a visualização de um arquivo ou monitoração do *joystick*.

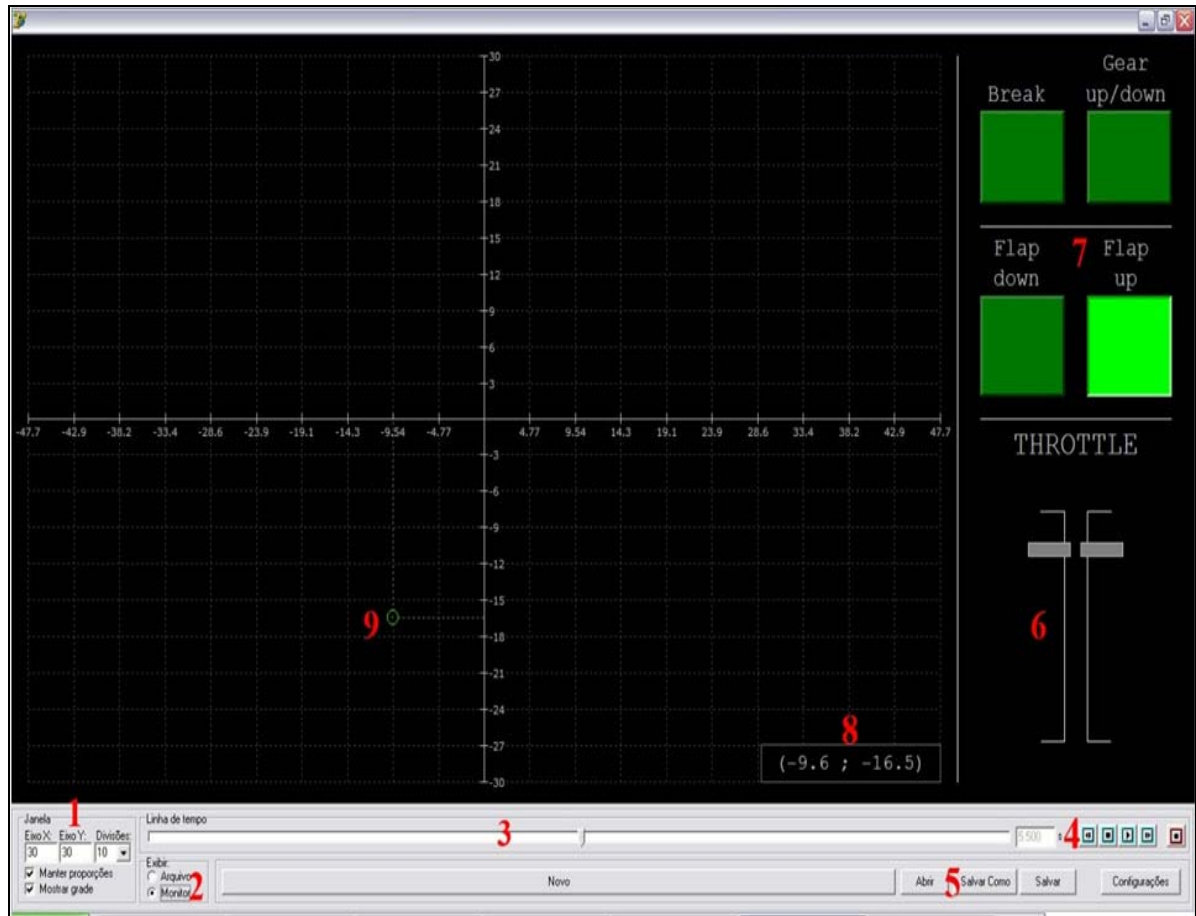


Figura 107 - Imagem com *print screen* da tela principal: tela principal do *Flight Capture*.
Fonte: O autor (2007).

3.1.3.8.1 Descrição de cada área da tela principal (de 1 a 9)

1) Configuração da janela: é utilizada para melhor visualização dos resultados. É possível configurar os limites na janela do gráfico dos eixos x e y, sendo que o campo com divisões permite selecionar quantas divisões a janela mostrará. Marcando “manter proporções” a proporção da captura é mantida, independente do dimensionamento da tela; é possível mostrar ou ocultar a grade, alterando o item “mostrar grade”. É importante ressaltar que essas configurações não afetam a captura dos dados;

2) Exibir: permite selecionar o modo de exibição para arquivo (exibe o arquivo atual) ou para monitor (monitora os comandos no joystick);

3) Linha do tempo: permite avançar ou retroceder manualmente nos pontos de captura;

4) Botões de gravação e reprodução: são utilizados para iniciar e parar a reprodução do arquivo atual; também é possível avançar ou retroceder uma captura clicando nos botões <| e |>. O botão vermelho da direita é utilizado para iniciar e parar a gravação;

5) Botões: novo (cria um novo arquivo); abrir (permite abrir arquivos previamente salvos); salvar como (salva o arquivo atual em um novo arquivo); salvar (salva o arquivo atual); configurações (abre o formulário de configurações);

6) *Throttle*: mostra a posição do manete, podendo variar entre 0 e 100%;

7) Botões do *joystick*: nessa parte são exibidos os quatro botões do controlador. As denominações (*labels*) correspondentes às funções são definidas pelo usuário no formulário de configuração. O comando do botão apresenta na tela a cor verde claro quando é pressionado;

8) Coordenada dos eixos x e y: mostra a coordenada atual dos eixos (em graus);

9) Ponto: ponto da coordenada atual.

Há, ainda, um formulário de configuração onde é possível selecionar a função de cada botão e, também, os limites máximos que o *joystick* permite girar em cada eixo. Para facilitar a localização dos botões, há sinalização a partir do retângulo cinza ao lado de cada item, que fica verde quando pressionado o botão correspondente (Figura 108).



Figura 108 - Imagem com *print screen* da tela (configurações): formulário de configurações. Fonte: O autor (2007).

3.1.3.8.2 Quantificação da desorientação espacial

A partir da captura dos sinais é possível visualizar na tela do aplicativo os pontos dispostos em dois eixos (x e y), permitindo o estabelecimento de diversas formas de parametrização, a partir de calibragem com o máximo deslocamento do manche à frente e para trás, bem como para os lados, indicando exatamente em que posição estava o manche da aeronave, em relação ao ponto neutro, em cada etapa do experimento.

Assim, se pode precisar e comparar desempenhos a partir da captação dos sinais provenientes do manche, além de se correlacionar estes dados com a atitude de voo imposta à aeronave ao cruzar os dados com os do *Flight Simulator*. Portanto, o sistema permite ao piloto verificar a efetividade das ações executadas no comando de voo, comparar seus diversos desempenhos, bem como estabelecer comparações com resultados de outros pilotos.

3.1.3.9 Microcâmara Infravermelho e Unidade Transmissora VHF

A adaptação de uma microcâmara infravermelho permitiu captar imagens do interior da “nacele” durante os testes de desorientação, mesmo com pouca luminosidade dentro da cobertura, a fim de se avaliar as reações do piloto nas diversas etapas da experimentação. A câmera transmite os sinais ao monitor por ondas em frequência VHF, sendo captados por uma antena convencional. O monitor de televisão (14 polegadas) conecta-se ao vídeo cassete, ligado à placa de captura do computador. A opção de utilização de um videocassete permite, também, a gravação simultânea em VHS. Um software de captura (*Windows Movie Maker*) permite o armazenamento das imagens em formato digital (*wmv*) para reprodução posterior. A microcâmara está posicionada logo acima do monitor LCD, fixada com fita adesiva dupla-face e direcionada para o indivíduo, interligando-se à unidade transmissora por cabos. Estes dispositivos foram incluídos apenas como acessórios, não sendo prioridade, neste momento, a preocupação com a qualidade das imagens (Figura 109).



Figura 109 - Microcâmara Infravermelho.
Fonte: O autor (2007).

A unidade transmissora (Figura 110) está fixada abaixo da placa horizontal, entre os dois tubos frontais de aço.



Figura 110 - Unidade transmissora VHF.
Fonte: O autor (2007).

As imagens capturadas pela microcâmara são transmitidas por um dispositivo transmissor que envia os sinais por onda de TV na frequência VHF correspondente ao canal oito. A função do Vídeo Link, visível na Figura 110, é receber as imagens da câmera e transmiti-las em frequência VHF, para serem captadas pela antena convencional (VHF) do monitor de televisão. A corrente de energia da unidade transmissora está na faixa de 280 mA.

3.1.3.10 Sistema HUB USB sem fio (WUSB)

O WUSB (*Wireless USB*) é uma versão sem fios de um HUB com portas USB, que utiliza o sistema UWB para a transmissão de dados a curtas distâncias, a partir de sinais de baixa potência. Em teoria, o WUSB suporta taxas de transmissão de até 480 *megabits* a distâncias de até três metros e 110 *megabits* em até dez metros. Como o

sinal utiliza uma potência muito baixa, o WUSB é adequado para interligar aparelhos dentro do mesmo ambiente, sem que existam obstáculos importantes entre eles, o que se adapta à proposta da CREC-Ap. Desta forma, a partir da necessidade de um sistema que ficasse fixado à cadeira e próximo à unidade receptora dos sinais no computador, para evitar perdas significativas, a opção foi em prol do WUSB, cuja funcionalidade permite enviar/receber sinais tanto ao monitor quanto ao *joystick*, estes conectados a um expensor de portas com interface USB. O sistema utilizado foi o fabricado pela Belkin® (Figura 111).

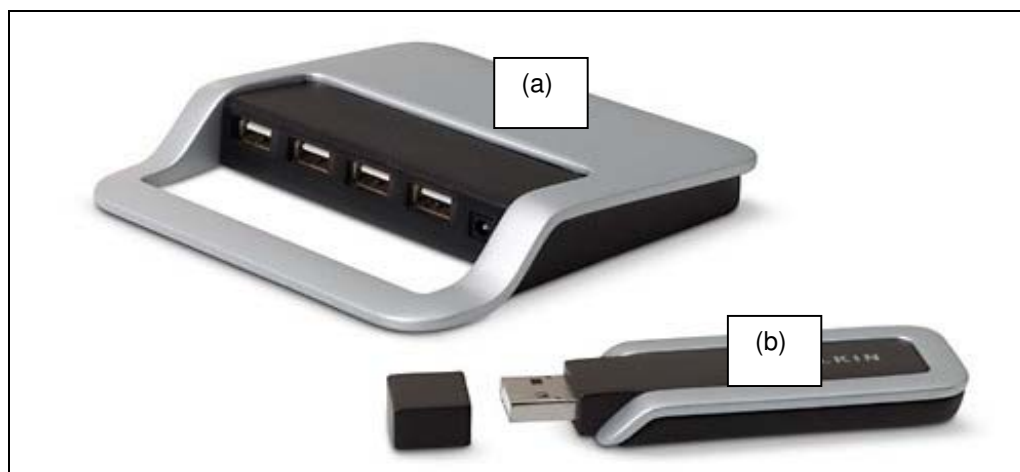


Figura 111 - USB sem fio (WUSB): unidade transceptora HUB sem fio com portas USB (a); unidade transceptora USB que fica acoplada ao computador (b).
Fonte: O autor (2007).

As taxas de transmissão alcançadas na prática, em virtude da curta distância entre a unidade transceptora instalada na cadeira e a unidade transceptora instalada no computador, estão de acordo com o que estabelece o fabricante do produto, com uma corrente de energia na faixa de 100 mA.

No topo da pirâmide (Figura 112) estão os 480 *megabits* "brutos", que nunca são atingidos em situações reais, devido a uma série de fatores, como as perdas causadas pelo protocolo de transmissão, correção de erros e assim por diante. No segundo nível, estão as controladoras USB 2.0 com cabos, que atingem taxas reais em torno de 270 a 320 *megabits*. O restante é perdido devido ao protocolo de sinalização usado, que garante que os dados sejam transmitidos de forma confiável, mas, em troca,

compromete uma parcela da taxa de transmissão. Assim, as taxas obtidas na prática – sobretudo a distâncias maiores do que três ou quatro metros – são muito inferiores, de forma que, em termos de velocidade, o WUSB não se compara diretamente ao USB 2.0. Na terceira camada (cor laranja) está o desempenho atingido pelos dispositivos WUSB em condições ideais (curtas distâncias, sem obstáculos e sem interferências).

A opção foi instalar os dois componentes a uma distância máxima de 100 cm, a fim de se obter o máximo aproveitamento da transmissão de sinais, minimizando as interferências. Como seriam utilizadas simultaneamente duas fontes de sinais para serem transmitidos pelo WUSB, sendo uma fonte do vídeo e outra do *joystick*, houve preocupação em relação à taxa de transmissão real, conforme demonstrado logo abaixo, de acordo com dados do fabricante.

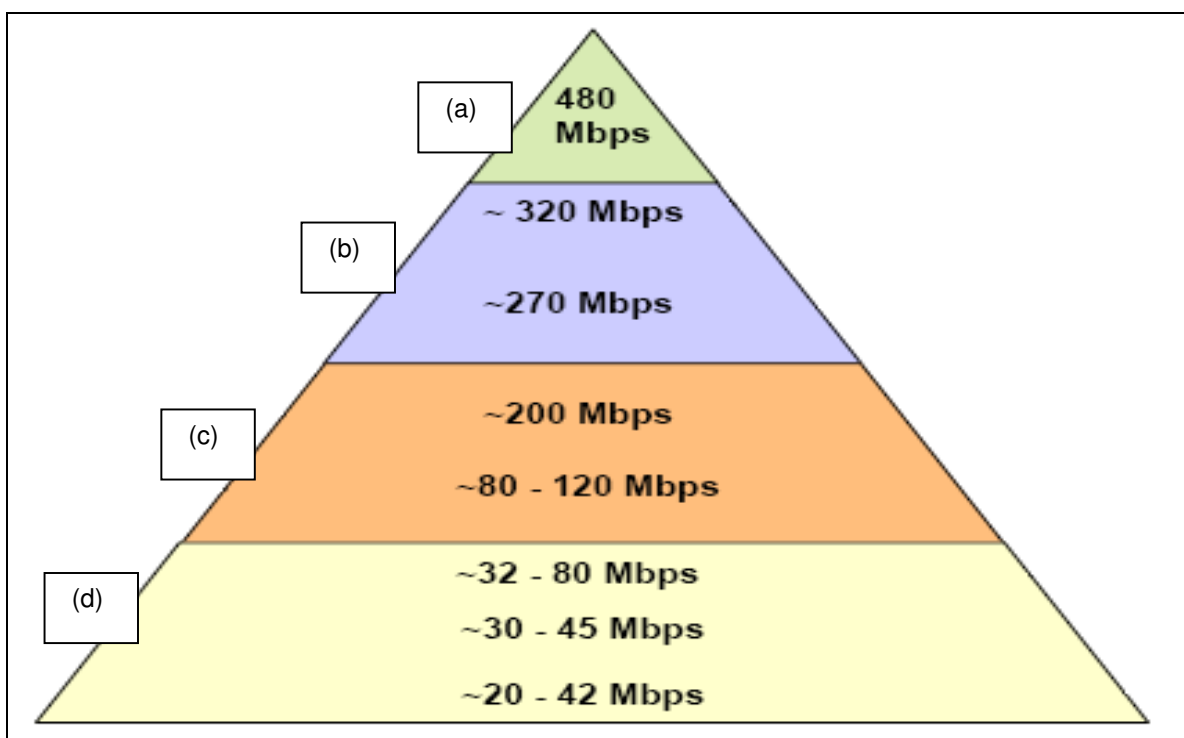


Figura 112 - Demonstração das taxas de transmissão do sistema WUSB: a faixa de cor verde corresponde a 480 *megabits/segundo* (Mbps), o que não é alcançado na prática (a); faixa na cor lilás corresponde a 270 a 320 *megabits/segundo*, o que é alcançado por sistemas USB 2.0 com cabo (b); faixa na cor laranja correspondendo de 80-120 a 200 *megabits/segundo*, o que é alcançado por dispositivos WUSB em condições ideais, ou seja, sem obstáculos ou interferências (c); faixa na cor amarela correspondendo de 20-42 a 32-80 *megabits/segundo*, sendo que se estima que a taxa de transmissão obtida na prática esteja ao redor de 30 a 45 *megabits/segundo* (d).

Fonte: <http://www.guiadohardware.net:80/artigos/entendendo-wusb>

Os primeiros testes foram feitos com a resolução de tela do computador em 1280 x 1024 *pixels*, o que demonstrou que o sistema teria excessiva perda na taxa de transmissão, em função da lentidão na troca das telas. Assim, buscou-se, sucessivamente, de forma decrescente, uma menor resolução de tela, tendo-se adotado a de 800 x 600 *pixels*.

Desta forma, a taxa de transmissão estimada em 30 a 45 Mbps permite, satisfatoriamente, a transmissão dos sinais de vídeo e do *joystick*, de acordo com os testes. O WUSB utiliza um sistema de associação e autenticação para garantir a segurança da transmissão, de forma que, cada vez que se instala um novo dispositivo, faz-se necessário associá-lo ao computador, para somente então se poder usá-lo, o que confere privacidade aos dados. Há *leds* indicadores de cor verde que se acendem quando os pacotes estão sendo transferidos.

3.1.3.11 Monitor de vídeo LCD de 19 polegadas

O monitor utilizado foi um LCD Flatron L 1950H de 19 polegadas (19") da LG® cuja resolução máxima é de 1280 x 1024 (75Hz) com *pixel pitch* de 0,294; a voltagem, auto-ajustável, é de 100 ~ 240VAC (50/60Hz).

As dimensões aproximadas são 37 x 40,2 x 21 cm (A x L x P); o peso é de 4,1 kg. Segundo dados do fabricante, este monitor com tecnologia *f-Engine* trata as imagens automaticamente para ter cores mais naturais e vivas; dentre outras especificações, destacam-se o brilho de 300 cd, o contraste de 2000:1 (*Digital Fine Contrast - DFC*), o ângulo de Visão de H 160° / V 160°, o tempo de resposta de 5 ms e o consumo de energia de 37 W. A corrente elétrica medida para o monitor está na faixa de 0,8 A (Figura 113).



Figura 113 - Vista frontal do monitor LCD de 19 polegadas.
Fonte: <http://www.lg.com.br>

A fixação do monitor foi adaptada aproveitando-se a reduzida espessura do mesmo (Figura 114), o que permitiu a utilização de uma estrutura desenvolvida para esta finalidade, como parte da estrutura da CREC-Ap.

Em função da espessura reduzida, houve melhor aproveitamento do espaço ocupado pelo monitor; da mesma forma, o peso reduzido contribuiu para a estabilidade do sistema, além de ter dispensado reforços estruturais para sustentação do monitor.



Figura 114 - Vista de perfil do monitor LCD 19 polegadas.
Fonte: <http://www.lg.com.br>

A fim de se aproveitar melhor o espaço dentro da cabine experimental foi feita a substituição do sistema de fixação original do monitor (pedestal) por uma placa fixada na parte superior da estrutura de tubos de aço (Figura 115). Foi utilizada a mesma furação com quatro parafusos, porém, adotando-se parafusos de aço mais longos, do tipo M4.



Figura 115 - Vista da parte posterior do monitor: detalhamento da fixação em quatro pontos (a).
Fonte: <http://www.lg.com.br>

Os dois tubos de aço da parte frontal da CREC-Ap estão unidos na parte superior pela placa vertical, por intermédio de solda. A placa permite fixar o monitor LCD (Figura 116).

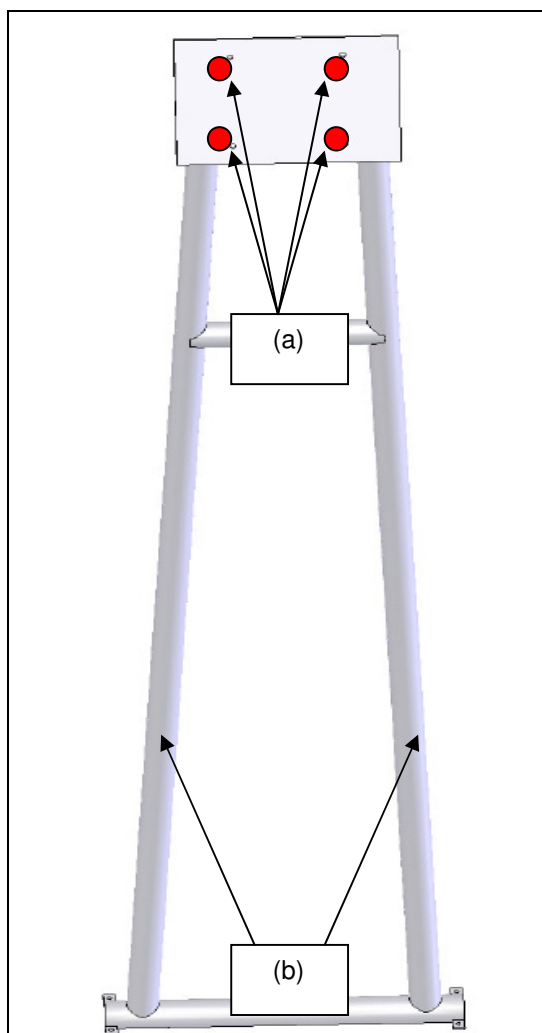


Figura 116 - Estrutura tubular de fixação do monitor: placa vertical com quatro orifícios (a); tubos de aço da parte frontal (b);

Fonte: Desenho desenvolvido pelo Engenheiro Felipe Prehn Falcão (2007).

Tal solução para fixação do monitor (Figura 117) permitiu que fosse estabelecido um contorno na estrutura de alumínio da CREC-Ap passando rente à parte posterior do mesmo, mantendo formato similar ao que seria um *cockpit* da aeronave F-5, além de favorecer a distribuição do peso. Também se obteve ganho em relação à fixação e distribuição dos equipamentos, mantendo-os o mais próximo possível do eixo central de rotação da cadeira, a fim de se evitar oscilações desnecessárias, o que poderia forçar a estrutura e o motor.



Figura 117 - Monitor LCD e *joystick* fixados na CREC-Ap.
Fonte: O autor (2007).

3.1.3.12 Dispositivo de expansão de portas com interface USB

A opção para se conectar tanto o cabo do monitor (porta serial) quanto o cabo do *joystick* (interface USB) foi definida em prol da utilização de um dispositivo com expansão para quatro portas USB 2.0 de alta velocidade, uma porta para monitor de vídeo (VGA), além de uma porta para *ethernet*, além de duas outras (som estéreo e fone de ouvido), bem como uma entrada para adaptador de alimentação elétrica e interface para conexão USB com o computador.

A solução adotada foi o dispositivo de expansão de portas com interface USB da Kensington® (Figura 118).



Figura 118 - Dispositivo de expansão de portas com interface USB.
Fonte: O autor (2007).

Diversos periféricos podem ser conectados a este tipo de dispositivo de expansão de portas (Figura 119), simultaneamente, tendo sido utilizado, neste projeto, com o propósito de receber a conexão do cabo serial do monitor LCD e interface USB do *joystick*. Tal solução permitiu unificar dois tipos de cabo permitindo uma única interface (USB).

Utiliza-se a interface USB do dispositivo de expansão de portas para conexão com a unidade transceptora HUB sem fio do WUSB (móvel), que sofre rotação junto com a cadeira, transmitindo e recebendo sinais da unidade transceptora USB (fixa), acoplada ao computador.



Figura 119 - Periféricos acoplados ao expansor de portas.
Fonte: O autor (2007).

A configuração recomendada pelo fabricante para suportar este dispositivo foi suplantada com margem de segurança pela máquina utilizada neste trabalho, que contempla um processador de 2.2 GHz, com placa de vídeo de 512 MB de memória RAM, disco rígido com capacidade para 160 GB e memória RAM de 1,96 GB, além de *drive* para CD-ROM/DVD. A corrente de energia da unidade HUB sem fio deste dispositivo é de 100 mA, sendo que está conectado à régua de distribuição de energia elétrica da CREC-Ap.

3.1.3.13 *Software* de Simulador de Vôo (*Flight Simulator*)

A opção foi utilizar o *software Flight Simulator X*, da Microsoft®, a fim de se definir a configuração da aeronave desejada, compatibilizando-a com a taxa de transmissão do WUSB. O software permite configurar uma aproximação de pouso com imagem visualizada no monitor pelo aluno enquanto “pilota” a CREC-AP.

3.1.3.14 Conector rotativo para alimentação elétrica

Como o monitor, o dispositivo de expansão de portas, o HUB USB sem fio e a unidade transmissora de rádio (microcâmera) sofrem rotação junto com a cadeira. A alimentação elétrica dos mesmos se dá por um conector rotativo blindado, Mercotac®, de dois contatos, com capacidade para 4 A (Figura 120), que permite montagem tanto vertical quanto horizontal e pode girar com uma rotação de até 2000 rpm. A parte superior (móvel) do conector rotativo sofre rotação junto com o eixo da cadeira.



Figura 120 - Conector rotativo de 4A.
Fonte: <http://www.mercotac.com>

Em virtude do posicionamento do sistema de sustentação e do eixo da cadeira, o conector rotatório foi fixado internamente, por prensagem, na parte inferior do eixo de rotação da CREC-Ap. O conector rotativo tem reduzidas dimensões, o que facilitou a instalação. O sistema completo consta de três partes, sendo um componente blindado e dois conectores, correspondendo ao modelo 205, da Mercotac® (Figura 121).

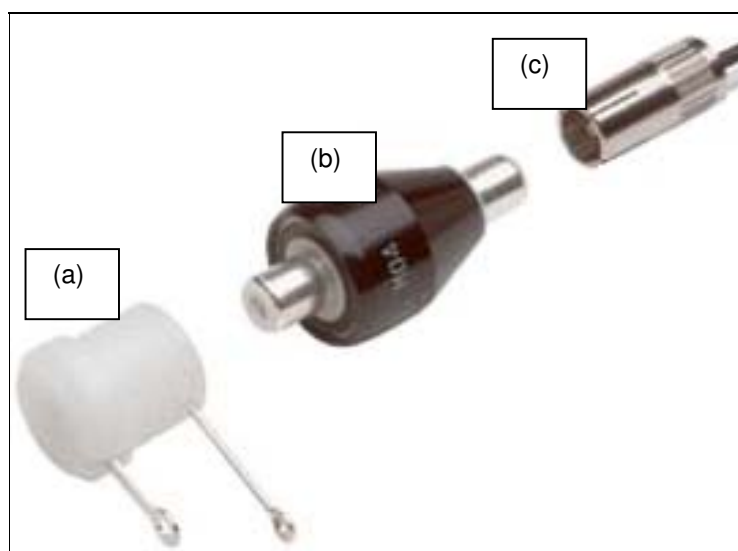


Figura 121 - Vista dos componentes separados: conector de plástico, parte inferior fixa (a); conector blindado, parte superior móvel (b); conector metálico, parte superior móvel (c).

Fonte: <http://www.mercotac.com>

O acoplamento dos componentes se dá por encaixe direto (Figura 122).

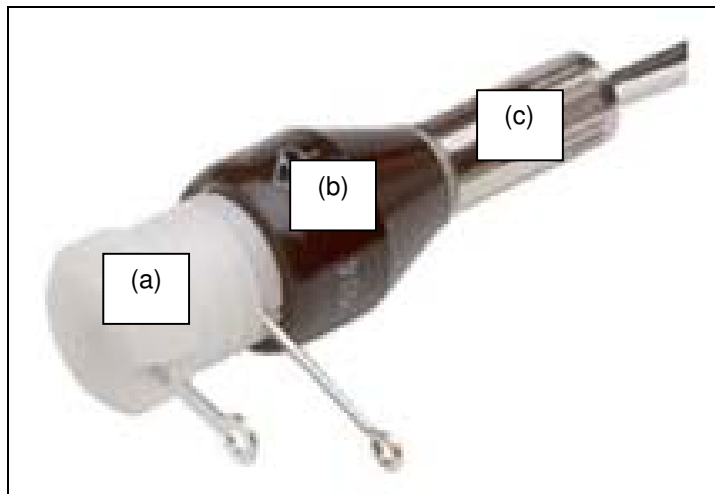


Figura 122 - Vista dos três componentes encaixados: conector de plástico, parte inferior fixa (a); conector blindado, parte superior móvel (b); conector metálico, parte superior móvel (c).

Fonte: <http://www.mercotac.com>

Na parte superior (rotatória), o dispositivo está encaixado no eixo central da cadeira; na parte inferior (fixa), o dispositivo se conecta à fonte de alimentação elétrica da CREC-Ap. A rotação se dá no sentido anti-horário.

Na parte inferior, que é fixa, o dispositivo se conecta à fonte de alimentação elétrica da cadeira, cujo cabo de força entra pela lateral da base da cadeira (Figura 123).

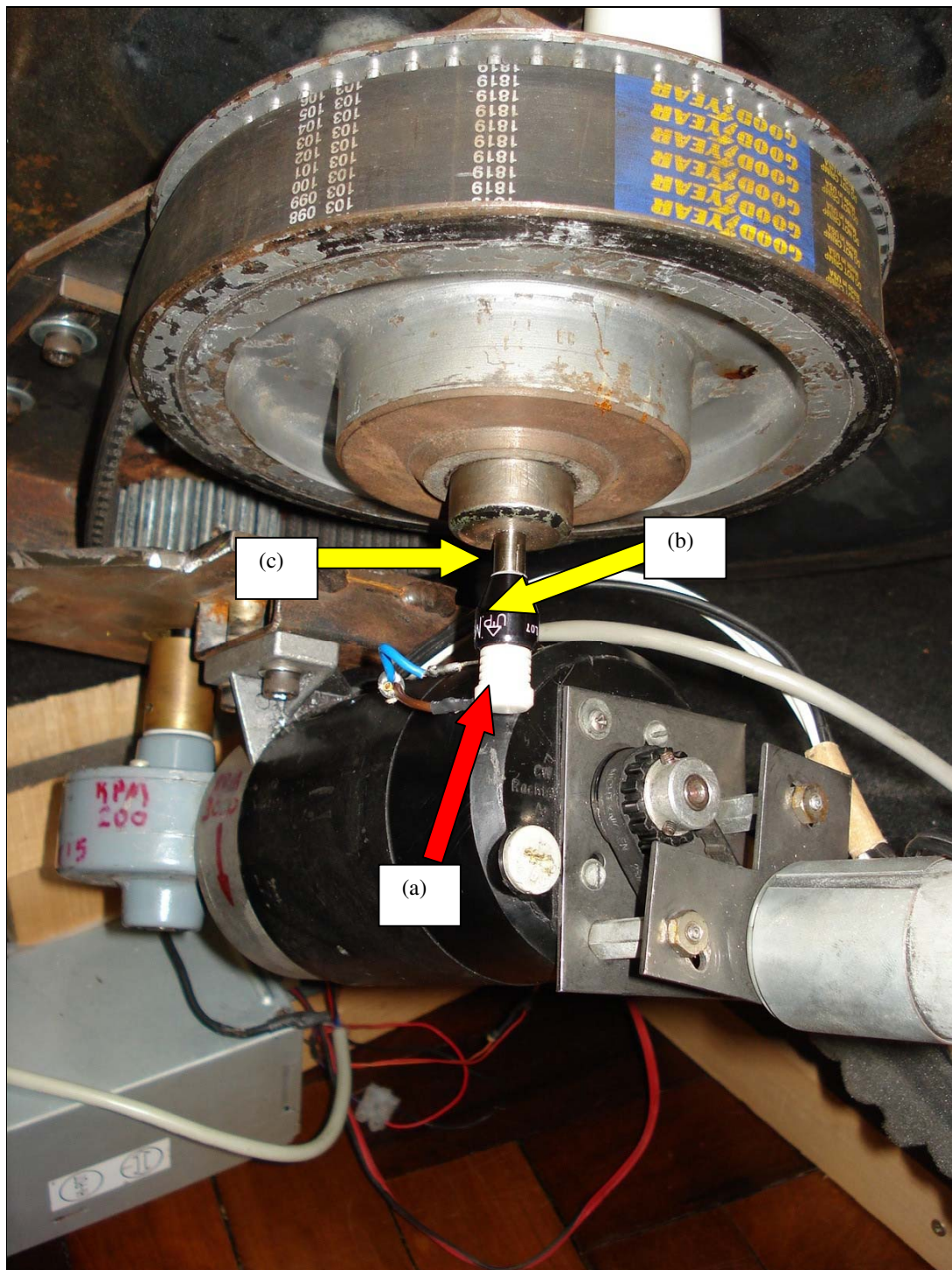


Figura 123 - Instalação do conector rotativo: parte inferior fixa (a); conjunto superior rotatório (b); detalhe de fixação do componente superior do conjunto móvel ao eixo de rotação da cadeira (c).

Fonte: O autor (2007).

3.1.3.15 Régua para distribuição de energia elétrica

Uma régua com filtro de linha foi instalada na parte posterior da cadeira para distribuição da energia elétrica, com seis encaixes para flechas e botão liga-desliga. A régua alimenta o monitor e os conversores dos demais componentes (o expensor de portas, a unidade HUB USB sem fio e a unidade transmissora de rádio com microcâmera), e recebe energia do conector rotativo por intermédio de um cabo de força que passa por dentro do eixo central de rotação da CREC-Ap. A alimentação do cabo de força se dá pela rede com tensão de 127 volts (Figura 124).



Figura 124 - Fixação da régua de distribuição de energia elétrica: detalhe da régua fixada por amarras de plástico na parte posterior da CREC-Ap.
Fonte: O autor (2007).

3.2 Etapa II - Integração dos Dispositivos e Sistemas da CREC-Ap com a Unidade de Controle

A integração dos diversos dispositivos e sistemas com o computador da unidade de controle permitiu processar e armazenar as informações para posterior utilização.

O sinal da microcâmera foi captado pela antena de televisão cujo monitor foi sintonizado no mesmo canal da unidade transmissora de rádio (canal oito).

Um aparelho de videocassete foi utilizado para captar o sinal da televisão e, a partir de uma placa de vídeo, as imagens foram capturadas por um software (*Windows Movie Maker*) para posterior visualização, em formato digital.

O monitor de televisão permitiu a visualização em tempo real.

Em termos de *hardware*, a escolha recaiu sobre um computador que foi superdimensionado em relação ao mínimo exigido para os diversos aplicativos e sistemas conectados (processador de 2.2 GHz, com placa de vídeo de 512 MB de memória RAM, disco rígido com capacidade para 160 GB e memória RAM de 1,96 GB).

A unidade receptora do sistema WUSB foi conectada a uma extensão que permitiu a fixação logo abaixo da cadeira, ligando-se ao computador. Ao iniciar, fez-se necessário autenticar a utilização do WUSB (código de segurança).

O computador executou o *Flight Simulator X*, o *Flight Capture* e gravou as imagens da microcâmera em formato *wmv*, o que permitiu processar todas as informações provenientes destes sistemas para posterior aplicação na quantificação da desorientação espacial.

3.3 Etapa III - Testes com a Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap)

Ao término da etapa de integração das diversas interfaces dos vários componentes e sistemas da CREC-Ap, o autor deste trabalho efetuou diversos testes na cadeira de forma a checar a utilização plena dos sistemas, bem como fazer ajustes necessários ao adequado funcionamento da mesma.

Alguns perfis de treinamento foram experimentados somente a título de verificação dos sistemas e interface com o computador, a exemplo do que provocou o Efeito de Coriolis (Figura 125).

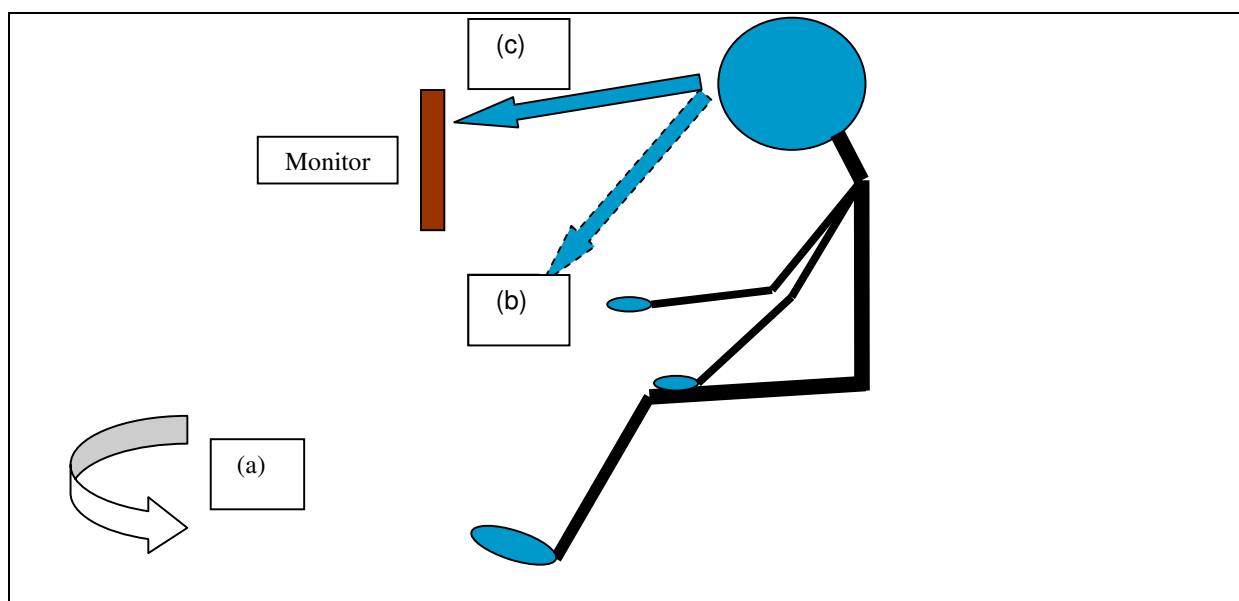


Figura 125 - Perfil para teste da indução do Efeito de Coriolis: o autor deste trabalho efetuou teste na cadeira, com início da rotação da cadeira a 20 rpm, em sentido anti-horário (a); indivíduo com a cabeça inclinada para frente cerca de 45° (b); elevação da cabeça cerca de 45° para cima imediatamente ao suspender a rotação da CREC-Ap (c).

Fonte: O autor (2007).

Etapas do teste realizado pelo autor deste trabalho para indução do Efeito Coriolis

- Procedimentos de preparação da unidade de controle para o teste com a CREC-Ap:
 - Instalar o computador em mesa próxima à CREC-Ap;
 - Verificar as conexões de todos os cabos com a cadeira;
 - Ligar o computador e verificar a execução dos aplicativos;
 - Validar a identificação do sistema WUSB;
 - Iniciar os aplicativos;
 - Escolher o perfil a ser executado no treinamento de forma a definir a configuração do *Flight Simulator* (decolagem, pouso, navegação, dentre outros).
- Procedimentos efetuados na CREC-Ap antes do teste:
 - Verificação da área livre para o giro da cadeira;
 - Verificação das conexões de todos os cabos e sistemas;
 - Posicionar o pedal de freio;
 - Ligar a energia elétrica na cadeira;
 - Efetuar alguns giros da CREC-Ap, a fim de testar o sistema de freio;
 - Abrir a cobertura e verificar o funcionamento interno dos sistemas (monitor e *joystick*);
 - Verificar a captação de imagens pela microcâmera, visualizando o monitor de TV e confirmando a chegada da imagem no computador;
 - O operador da CREC-Ap auxiliar o autor a entrar no *cockpit*;
 - Auxiliar a fixação dos cintos de segurança;
 - Explicar o funcionamento dos diversos sistemas ao autor deste trabalho e posicionamento que deverá ser adotado pelo mesmo;
 - Fechar a cobertura;
 - Testar o funcionamento dos dispositivos (*joystick*, monitor e câmera) com a cadeira parada;
 - Proporcionar uma adaptação ao autor deste trabalho deixando-o realizar uma aproximação para pouso com a cadeira parada;
 - Ajustar o Cronômetro de Monitoramento do tempo de giro;

- Configurar novamente o início do procedimento no *Flight Simulator X*;
- Solicitar ao autor deste trabalho que permaneça olhando para a tela e pilotando com a cabeça inclinada cerca de 45° para frente;
- Iniciar o giro da cadeira mediante acionamento do dispositivo de controle eletrônico (tacômetro) ajustado para 20 rpm;
- Manter o giro da cadeira por 30 segundos;
- Após 30 segundos de rotação, acionar o freio hidráulico parando a CREC-Ap, desligando o tacômetro, solicitando que o autor deste trabalho eleve a cabeça, subitamente, em cerca de 45°;
- Acompanhar a desorientação espacial induzida pelas imagens da câmera;
- Travar o cronômetro assim que o autor deste trabalho referir não mais estar desorientado, a partir de uma pilotagem eficiente verificada nas imagens do *Flight Simulator X*;
- Encerrar o teste com o registro das informações do simulador de vôo;
- Abrir a cobertura da cadeira para permitir a saída do autor deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões estão apresentados em três etapas:

- Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada;
- Etapa II - Integração dos dispositivos e sistemas da CREC-Ap com as diversas interfaces;
- Etapa III - Testes com a CREC-Ap.

4.1 Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap)

4.1.1 Estrutura em alumínio

A estrutura de alumínio confeccionada de acordo com as referências obtidas na nacele de um F-5 M criou um ambiente semelhante ao de um *cockpit*, permitindo uma melhor ambientação, de acordo com os testes feitos, uma vez que há similaridade considerando-se o espaço interno, disposição dos equipamentos e ângulo de visão. A sustentação da cobertura proporcionada pela estrutura de alumínio também foi adequada demonstrando que os tubos foram bem dimensionados e atenderam aos requisitos propostos de baixo custo, facilidade de manuseio para dobragem, leveza e rigidez suficiente.

As extremidades inferiores dos tubos, próximas aos pés, se encaixaram perfeitamente na barra transversal de aço, firmando o conjunto (Figura 126).

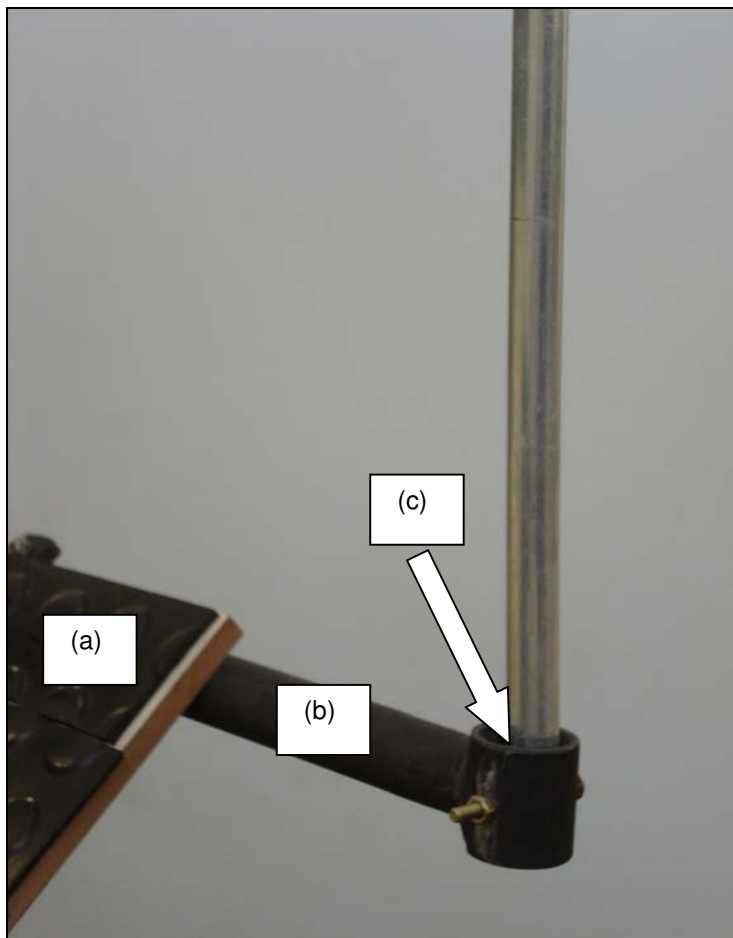


Figura 126 - Estrutura da parte frontal inferior: detalhe da estrutura em madeira para apoio aos pés (a); tubo transversal de aço (b); encaixe dos tubos de alumínio nos soquetes da estrutura de aço com fixação por parafusos (c).

Fonte: O autor (2007).

A fixação dos tubos de alumínio na lateral da cadeira se mostrou adequada, pois, a partir de um encaixe justo e fixado por meio de parafuso com borboleta, os tubos permaneceram na posição desejada, proporcionando a necessária estabilidade à estrutura.

4.1.2 Estrutura em aço

A estrutura em tubos de aço funcionou como arcabouço e suportou a instalação de diversos componentes (monitor, manche, microcâmera e conjunto de transmissão, expensor de portas USB, HUB USB sem fio), além de ter recebido adequadamente a fixação da estrutura de alumínio, na parte inferior frontal, junto ao apoio para os pés. A escolha do aço demonstrou ter sido adequada em termos de resistência, sendo que a estrutura proposta em tubos de diversos tamanhos se mostrou eficiente, permitindo a rotação da cadeira sem oscilações indesejáveis. O sistema de engate funcionou satisfatoriamente, permitindo efetuar um movimento de balsa para frente da parte frontal da estrutura, o que permitiu um acesso mais facilitado ao interior da CREC-Ap.

As extremidades inferiores dos tubos frontais apoiaram na barra tubular transversal, por engate móvel, sendo que tal solução funcionou conforme o planejado, permitindo mover a parte frontal para frente, devidamente encaixada nesta barra. Os encaixes na barra transversal demonstraram estar adequados ao propósito de fixar a estrutura de alumínio, por meio de parafusos, permitindo a rotação da cadeira sem quaisquer oscilações adicionais.

O acoplamento da estrutura em aço à base do assento por meio de soquetes presos por parafusos se mostrou eficiente. Da mesma forma, a fixação junto à estrutura de alumínio funcionou adequadamente, o que permitiu a rotação da CREC-Ap sem oscilações ou ruídos adicionais.

4.1.3 Estrutura de apoio para as pernas

A estrutura em MDF permitiu apoiar as pernas, o que proporcionou maior firmeza e estabilidade para os membros inferiores, que passaram a apoiar-se tanto nas plantas dos pés quanto nas panturrilhas.

4.1.4 Estrutura para apoio dos pés

A estrutura em MDF (8 mm) para apoio dos pés, fixada por parafusos ao tubo transversal, permitiu o descanso dos mesmos, em posição semelhante à que o piloto os dispõe nos pedais da aeronave. A peça de MDF conferiu a necessária firmeza ao apoio, sendo apoiada nos dois tubos da estrutura inferior. O revestimento de borracha antiderrapante se mostrou eficaz, não permitindo deslizar os pés sobre a superfície, o que conferiu maior segurança ao conjunto (Figura 127).

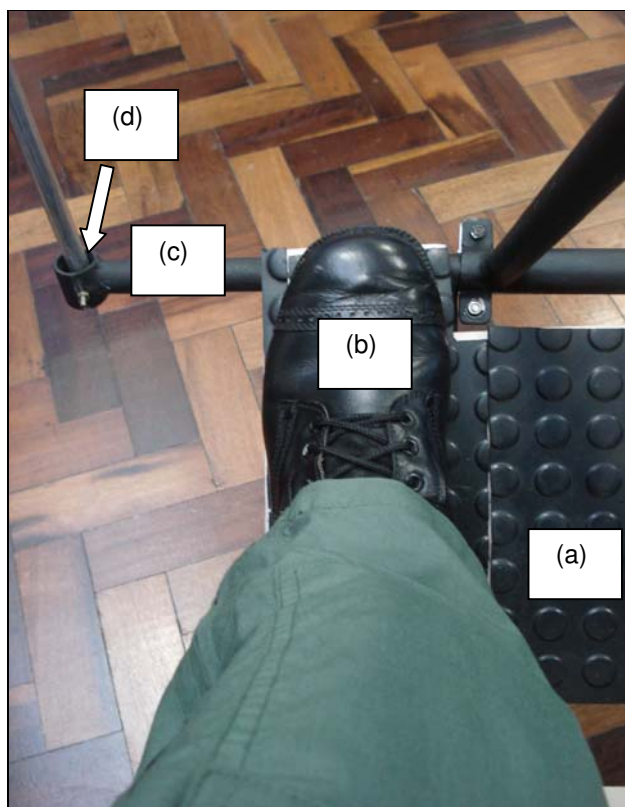


Figura 127 - Vista superior da parte frontal inferior: detalhe da estrutura em MDF para apoio aos pés revestida por lâmina de borracha antiderrapante (a); pé esquerdo do autor apoiado na estrutura de MDF (b); tubo transversal de aço (c); encaixe da extremidade do tubo de alumínio na estrutura de aço com fixação por parafuso (d).

Fonte: O autor (2007).

4.1.5 Cobertura

A atenuação foi alcançada, sendo que o tecido emborrachado (*blackout*), na cor bege, minimizou a influência do meio externo (som, ar e, principalmente, luminosidade), além de simular um *cockpit*, com dimensões aproximadas ao que há na aeronave F-5 M. As costuras se mostraram resistentes e a abertura lateral com zíper permitiu o fácil acesso do piloto (Figuras 128, 129, 130 e 131).



Figura 128 - Frente da CREC-Ap
Fonte: O autor (2008).



Figura 129 - Lateral Esquerda
Fonte: O autor (2008).



Figura 130 - Abertura lateral E
Fonte: O autor (2008).



Figura 131 - Interior da CREC-Ap
Fonte: O autor (2008).

4.1.6 Sistema de freio hidráulico

O sistema de freio hidráulico funcionou adequadamente permitindo a parada instantânea da cadeira nas diferentes etapas do experimento, além de ter proporcionado maior precisão neste procedimento do que a mão humana. O conjunto se mostrou adequado quanto ao dimensionamento, com grande margem de segurança, considerando-se o peso de um piloto e o peso da cadeira em rotação.

A operação se deu de forma absolutamente segura em função de o instrutor permanecer à distância segura das extremidades da CREC-Ap para acionamento do pedal durante a rotação, em virtude da utilização de uma extensão de mangueira de pressão para fluido hidráulico.

O pedal adaptado permitiu o acionamento mecânico do conjunto de freio, a partir de um pino metálico (atuador) que pressionou a entrada do reservatório de fluido hidráulico. A fixação do pedal ao chão pelas aletas metálicas o manteve na posição, impedindo qualquer deslocamento do mesmo, mostrando ser funcional.

Tanto o disco de freio quanto a pinça foram testados em diversos momentos e permitiram uma parada instantânea da cadeira. O fácil acesso para manutenção e visualização dos componentes do conjunto também foi fator que facilitou a operação e verificações quanto ao desempenho. O disco de freio fixado ao eixo de rotação, no topo cone, logo abaixo do disco metálico da base da cadeira, não sofreu qualquer oscilação, demonstrando a adequação quanto à instalação e fixação

A extensão da mangueira de pressão que conecta o reservatório de fluido à pinça de freio funcionou adequadamente, permitindo o acionamento do conjunto de forma precisa. (Figura 132).

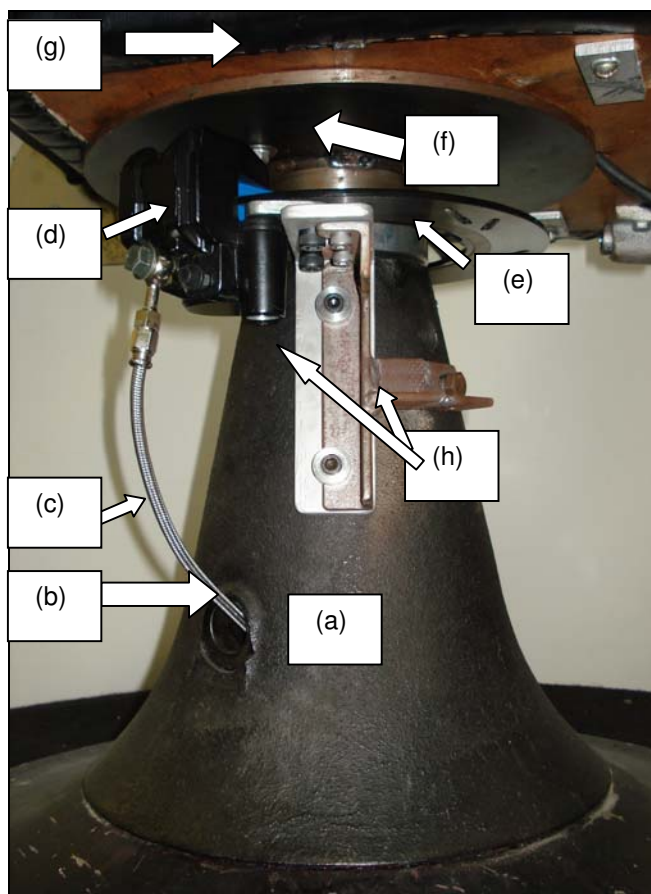


Figura 132 - Vista da instalação do conjunto de freio: cone de sustentação da cadeira (a); orifício lateral no cone (b); extensão da mangueira (c); conjunto de pinça e pastilha (d); disco de freio (e); disco metálico da base do assento (f); base do assento (g); peças em “L” e em “T”.

Fonte: O autor (2007).

A fixação adotada manteve a estabilidade do conjunto não permitindo quaisquer deslocamentos por ocasião do acionamento do freio. As duas peças confeccionadas, uma de alumínio, em formato de “L” e, outra, de ferro, em formato de “T”, promoveram a adequada fixação do conjunto de freio ao cone. A peça em “T” conferiu o necessário reforço por ter sido instalada justaposta à peça em “L”. A fixação das duas peças com parafusos se mostrou eficaz, mantendo o conjunto de freio absolutamente travado e firme por ocasião dos acionamentos, promovendo a parada imediata e segura da cadeira.

4.1.7 Manche do comando de vôo

O *joystick* cumpriu a finalidade desejada, ou seja, tendo permitido efetuar todos os comandos necessários durante os testes, bem como permaneceu firme na posição, a partir da fixação na placa horizontal, por intermédio de ventosas na parte inferior do mesmo. A similaridade com o manche real da aeronave proporcionou uma adequada ambientação ao piloto.

4.1.8 Aplicativo para quantificação da desorientação espacial

O aplicativo desenvolvido (*Flight Capture*) permitiu capturar e armazenar os movimentos realizados pelo manche durante as experimentações dos testes, integrando-se perfeitamente ao *Flight Simulator X*, da Microsoft®.

O componente de controle *ActiveX freeware DelphiX* possibilitou a comunicação através da porta USB do computador, o que tornou possível obter uma amostragem satisfatória dos sinais originados no *joystick*.

A utilização do aplicativo foi feita de forma simultânea com o *Flight Simulator* e permitiu a adequada captura de dados, além de ter possibilitado configurar e selecionar a função de cada botão do manche. Tal procedimento possibilitou ajustar (calibração) os limites máximos de movimento nos eixos x e y, em graus, gerando arquivos “configuracoes.ini”, que foram salvos automaticamente.

A gravação dos dados ocorreu conforme o esperado gerando um arquivo no formato texto (txt), constando a configuração dos botões, e também todos os pontos capturados durante o experimento, o que possibilitou quantificar a desorientação espacial em quaisquer etapas do experimento.

A tela principal do *Flight Capture* (Figura 133) permitiu o acesso a todas as funcionalidades do programa, o que facilitou a ambientação, pois guarda semelhança com os comandos e ajustes reais que são feitos na própria aeronave.

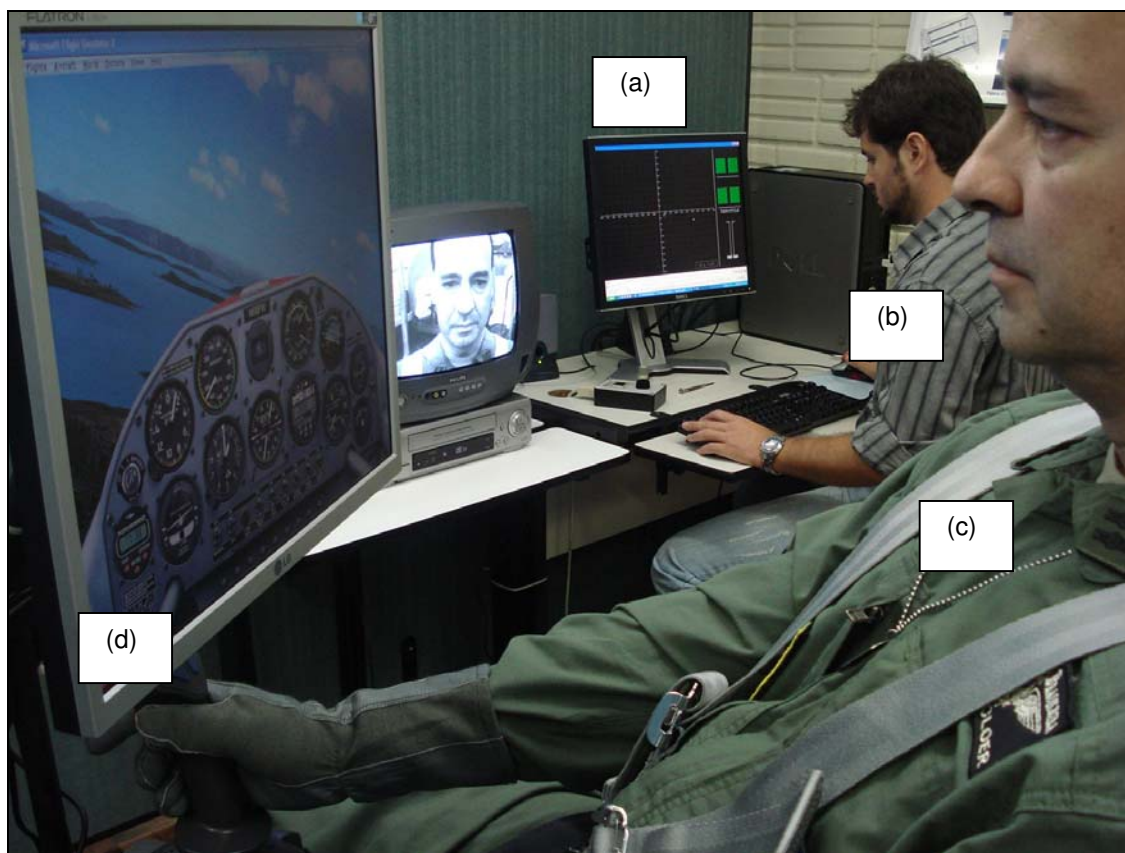


Figura 133 - Teste com a CREC-Ap: evidencia-se, ao fundo, a tela principal do programa *Flight Capture* (a), sendo operado pelo Engenheiro Felipe Falcão (b), enquanto o autor deste trabalho “pilota” (c) com imagens no monitor LCD embarcado (d).

Fonte: O autor (2007).

O resultado quanto à quantificação da desorientação espacial foi adequado ao objetivo deste trabalho, sendo que o sistema permitiu a captura dos sinais do manche, tendo sido possível visualizar na tela do aplicativo os pontos dispostos nos dois eixos (x e y), em todos os movimentos executados pelo manche, nas diversas etapas do experimento. O aplicativo permitiu estabelecer diversas formas de parametrização (máximo deslocamento do manche à frente ou para trás e para os lados), indicando exatamente em que posição estava o manche da aeronave, em relação ao ponto neutro, em cada etapa do experimento.

Desta forma, foi possível precisar e comparar desempenhos a partir da captação dos sinais provenientes do manche, além de se correlacionar estes dados com a atitude de vôo imposta à aeronave ao cruzar os dados com os do *Flight Simulator*. Tal

funcionalidade agregou grande potencial para treinamento de pilotos, uma vez que é possível demonstrar com riqueza de detalhes a atitude da aeronave, a partir das correções efetuadas. Portanto, o sistema desenvolvido permitiu se verificar a efetividade das ações executadas no comando de vôo, comparar os diversos desempenhos, bem como estabelecer comparações com outros resultados, demonstrando a eficiência e eficácia da CREC-Ap quanto ao propósito de demonstrar a desorientação, em prol da prevenção baseada no treinamento. A quantificação da desorientação foi demonstrada, de forma inequívoca.

4.1.9 Microcâmera Infravermelho e Unidade Transmissora VHF

As imagens captadas pela microcâmera durante os testes de desorientação, mesmo com pouca luminosidade dentro da cobertura, somente permitiram se manter o acompanhamento do procedimento. A câmera funcionou adequadamente com bateria e a transmissão por rádio do sinal ao monitor de televisão foi satisfatória, com imagens em preto-e-branco. A fixação da mesma ao monitor foi feita por fita adesiva dupla-face (Figuras 134 e 135).



Figura 134 - Microcâmera infravermelho fixada no monitor.
Fonte: O autor (2008).



Figura 135 - Monitor de vídeo de 14 polegadas: detalhe do monitor (a) com imagens captadas pela câmera infravermelho, em tempo real, durante teste na CREC-Ap.

Fonte: O autor (2008).

4.1.10 Sistema HUB USB sem fio (WUSB)

O HUB USB sem fio (*Wireless USB*) permitiu a transmissão e recepção dos sinais, tanto do monitor quanto do manche, sendo que as duas unidades do *WUSB* foram instaladas a um metro e meio de distância, uma da outra. Assim, foi possível enviar/receber sinais tanto do monitor quanto do *joystick*, estes conectados ao expansor de portas com interface USB, obtendo-se máximo aproveitamento possível na transmissão destes sinais, minimizando as interferências. As taxas de transmissão alcançadas na prática, em virtude da curta distância entre a unidade transceptora instalada na cadeira (Figura 136) e a unidade transceptora conectada ao computador, colocada logo abaixo do assento, sobre a base da cadeira (Figura 137), foram satisfatórias e alcançaram os objetivos propostos pelo projeto. As taxas de transmissão

foram estimadas, em média, em 30 a 45 Mbps e permitiram tanto a transmissão dos sinais de vídeo quanto do *joystick*, de acordo com os testes. A resolução de tela adotada foi a de 800 x 600 *pixels*, o que se mostrou suficiente ao propósito do trabalho.

A autenticação da transmissão foi efetuada com sucesso em todos os momentos em que se iniciou o sistema, tendo sido possível o envio dos pacotes de dados pelo sistema sem fio.



Figura 136 - Unidade Transceptora USB sem fio (WUSB): instalada na parte frontal da cadeira entre os dois tubos de aço, tendo sido fixada com amarras de plástico.

Fonte: O autor (2008).



Figura 137 - Transceptor USB.
Fonte: O autor (2008).

4.1.11 Monitor de vídeo LCD de 19 polegadas

O monitor LCD de 19 polegadas permitiu a adequada visualização das imagens tanto do *Flight Capture* (Figura 138) quanto do *Flight Simulator X* (Figura 139).



Figura 138 - Imagem do *Flight Capture* no monitor LCD durante calibragem do manche.
Fonte: O autor (2008).



Figura 139 - Imagem do *Flight Simulator X* no monitor LCD durante “vôo”.

Fonte: O autor (2008).

A fixação do monitor demonstrou estar adequada e suportou a rotação da cadeira sem quaisquer oscilações. Certamente tanto a espessura reduzida quanto o baixo peso contribuíram para a estabilidade do sistema. A estrutura de aço suportou a fixação do monitor sem permitir oscilações (Figura 140).



Figura 140 - Monitor LCD e *joystick*.
Fonte: O autor (2007).

4.1.12 Dispositivo de expansão de portas com interface USB

O dispositivo de expansão de portas com interface USB foi fixado junto à haste do encaixe dos tubos de aço (Figura 141) e permitiu acoplar o monitor de vídeo (VGA) e o *joystick*, sendo que o conjunto funcionou satisfatoriamente, permitindo a transmissão dos sinais a estes componentes e destes ao computador.

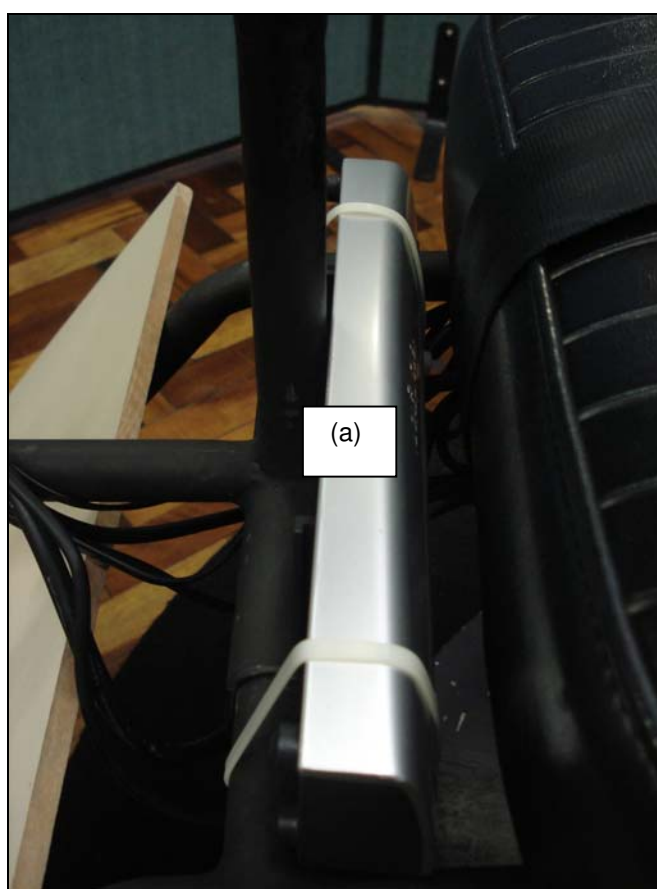


Figura 141 - Dispositivo de expansão de portas com interface USB: detalhe de fixação com amarras de plástico à estrutura de encaixe frontal, logo à frente do assento da CREC-Ap.

Fonte: O autor (2008).

4.1.13 *Software* de Simulador de Vôo (*Flight Simulator*)

A opção pelo *software Flight Simulator X* da Microsoft® foi adequada, o que viabilizou a reprodução da configuração da aeronave desejada, compatibilizando-a com a taxa de transmissão do WUSB. O software permitiu programar diversas etapas de vôo com imagem visualizada no monitor proporcionando a “pilotagem” da CREC-Ap, bem como confirmou o potencial para configurar quaisquer outros perfis desejados para quantificar a desorientação espacial (decolagem, navegação, dentre outros).

4.1.14 Conector rotativo para alimentação elétrica

A alimentação elétrica dos equipamentos embarcados na cadeira foi proporcionada pelo conector rotativo blindado Mercotac®, de dois contatos, com capacidade para 4ª, sendo que a carga total dos componentes embarcados ficou em 1,3 A. A fixação do conector rotativo ao eixo da cadeira facilitou a instalação e funcionou adequadamente. Na parte superior (rotatória) o dispositivo foi encaixado no eixo central da cadeira; na parte inferior (fixa), o dispositivo se conectou à fonte de alimentação elétrica externa da CREC-Ap.

4.1.15 Régua para distribuição de energia elétrica

A régua com filtro de linha permitiu a distribuição da energia elétrica para o monitor LDC, bem como ao conversor do dispositivo de expansão de portas, da unidade HUB USB sem fio e da unidade transmissora de rádio da microcâmera (Figura 142).



Figura 142 - Régua de distribuição de energia elétrica com periféricos: detalhe da régua fixada por amarras de plástico na parte posterior da CREC-Ap com os diversos conversores conectados.

Fonte: O autor (2008).

4.2 Etapa II - Integração dos dispositivos e sistemas da CREC-Ap com a Unidade de Controle

A integração dos diversos dispositivos e sistemas com o monitor de televisão/videocassete e com computador permitiu processar e armazenar as informações conforme o esperado (Figura 143). A escolha de um computador de alto desempenho permitiu a execução dos diversos aplicativos simultaneamente, além de ter sido posicionado próximo à CREC-Ap, o que minimizou uma eventual maior perda na taxa de transmissão do WUSB, à medida que as duas unidades ficaram próximas, de acordo com a distância preestabelecida (100 cm).



Figura 143 - Unidade de controle da CREC-Ap: monitor de televisão de 14 polegadas (a); videocassete (b); monitor LCD do computador (c); CPU (d); teclado sobre a mesa de apoio (e); tacômetro digital que controla a rotação da cadeira (f).

Fonte: O autor (2008).

O desempenho da máquina utilizada ficou de acordo com o mínimo exigido para executar os diversos aplicativos e sistemas conectados. A unidade receptora do sistema WUSB ficou conectada ao computador, sendo que, ao iniciar, fez-se necessário autenticar a utilização do WUSB (código de segurança), o que funcionou perfeitamente, conforme acompanhamento da transmissão dos pacotes de dados pelo acendimento dos LEDs de cor verde. O computador executou simultaneamente o *Flight Simulator X* e o *Flight Capture*, além de ter gravado as imagens da microcâmera.

O processamento de todas as informações provenientes destes sistemas permitiu a posterior aplicação para quantificação da desorientação espacial, a partir da demonstração de todos os movimentos efetuados no manche nas diversas etapas do experimento, sendo possível o acompanhamento do experimento pelo monitor de televisão, com imagens capturadas pela microcâmera (Figuras 144 e 145).

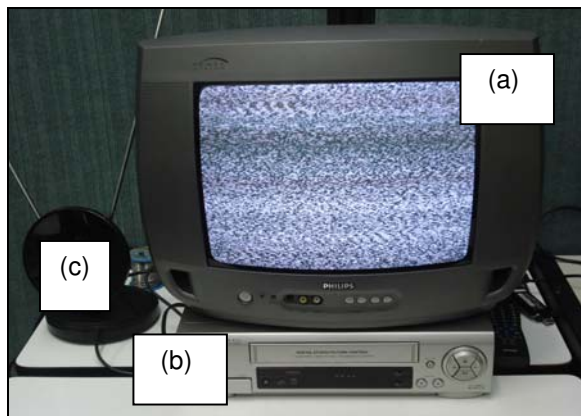


Figura 144 - Parte da unidade de controle: monitor de televisão (a); videocassete (b); antena interna convencional (VHF) de televisão (c).

Fonte: O autor (2008).

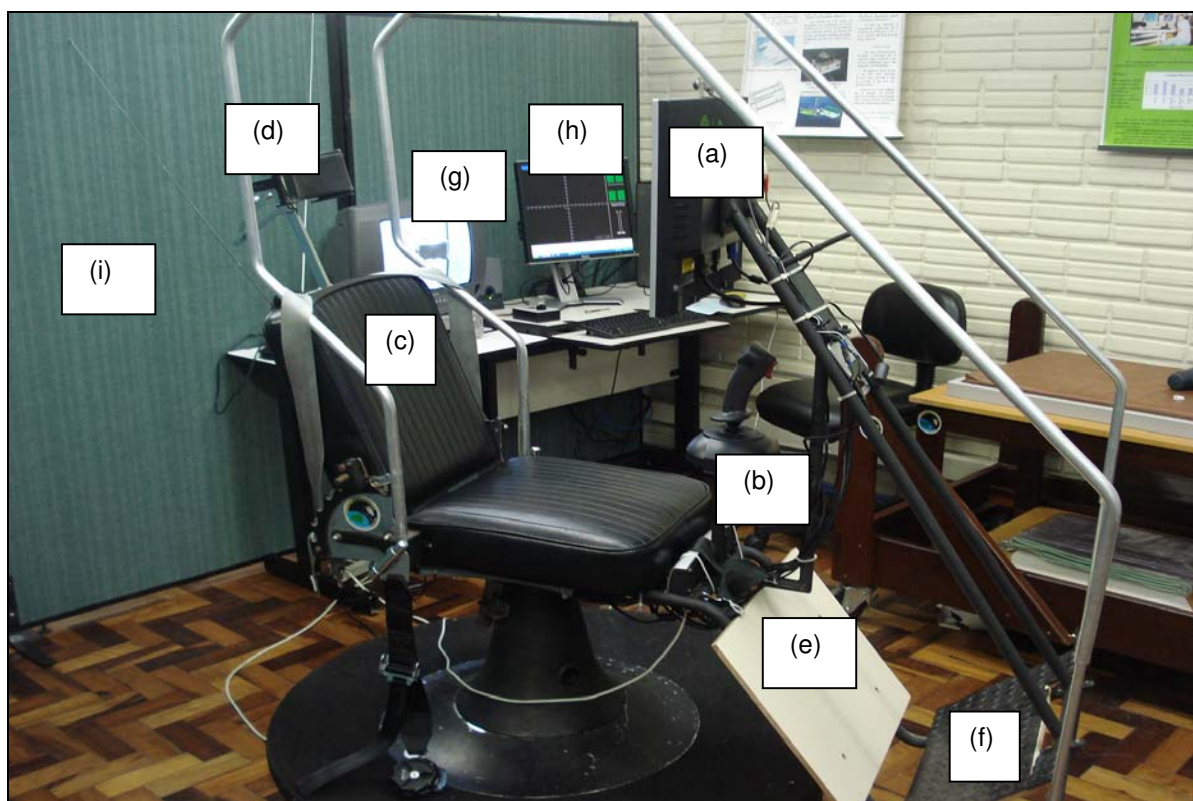


Figura 145 - CREC-Ap sem a cobertura e Unidade de Controle. No primeiro plano se identifica o monitor LCD da cadeira com microcâmera (a); manche (b); encosto da cadeira (c); apoio para a cabeça (d); apoio para as pernas (e); apoio para os pés (f). No segundo plano: monitor de televisão (g); monitor LCD do computador da unidade de controle da cadeira (h); biombo forrado com tecido na cor verde (i), delimitando a área de experimentação.

Fonte: O autor (2008).

4.3 Etapa III - Testes com a CREC-Ap

Os testes efetuados na cadeira permitiram checar a utilização plena dos sistemas, bem como fazer ajustes necessários ao adequado funcionamento da mesma.

Alguns perfis de treinamento foram experimentados, somente a título de verificação dos sistemas e interface com o computador.

Um dos perfis executados foi a estimulação simultânea de dois conjuntos de canais semicirculares (anterior e lateral), de forma a provocar o Efeito de Coriolis (Figuras 146 e 147):

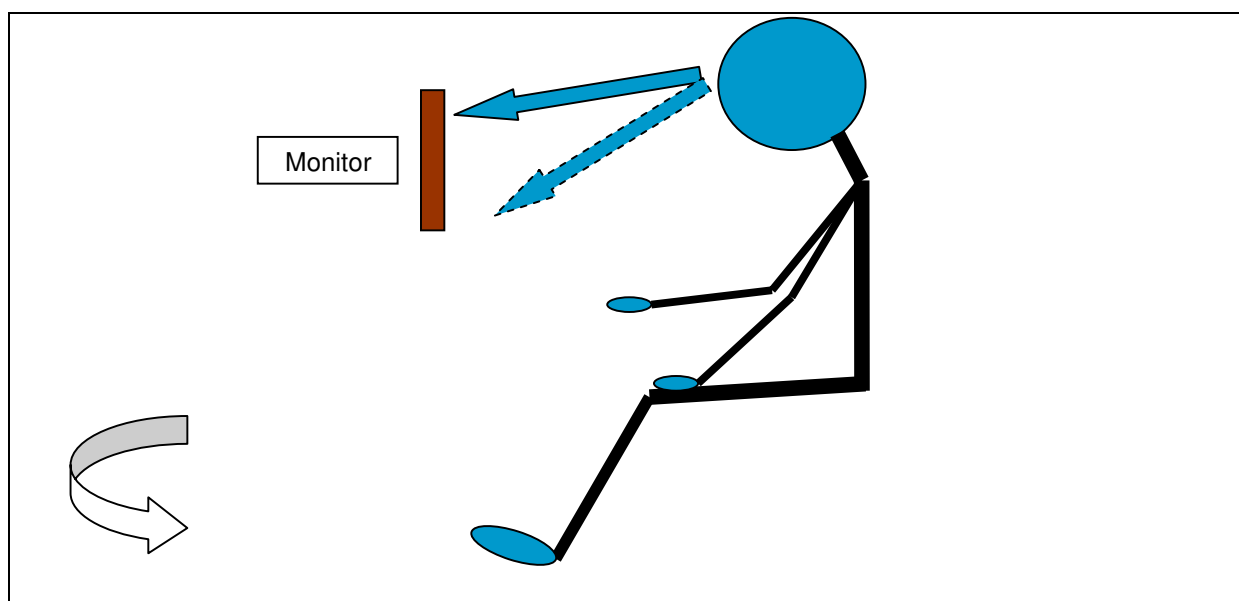


Figura 146 - Esquema demonstrando o perfil executado para teste da CREC-Ap na indução do Efeito de Coriolis.

Fonte: O autor (2007).

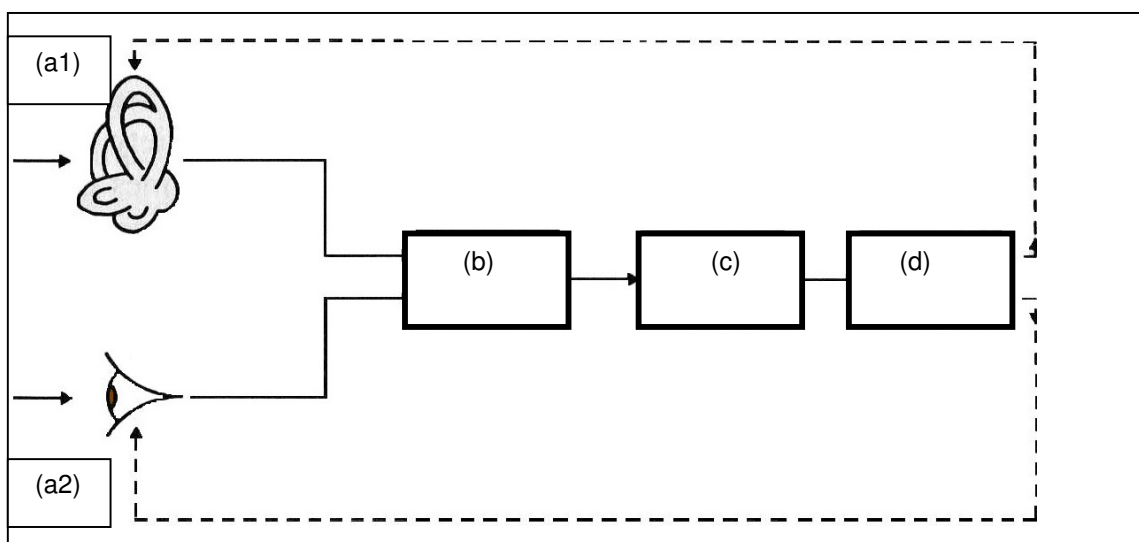


Figura 147 - Esquema demonstrando a utilização da CREC-Ap para quantificação da desorientação espacial pela estimulação dos canais semicirculares: ao parar a rotação da cadeira os canais semicirculares laterais (a1), cuja endolinfa se encontrava em estado de repouso pela inércia, são estimulados, o que produz uma sensação de movimento para o lado contrário, da mesma forma que, simultaneamente, ao levantar a cabeça, os canais semicirculares anteriores, produzem a sensação de que há movimento para baixo; os olhos percebem a imagem do painel da aeronave projetada na tela da CREC-Ap (a2), sendo que os instrumentos registram que a aeronave está nivelada; mesmo assim, o aluno é levado a corrigir atitudes de voo que não existem, pois está sofrendo ilusões, podendo tornar-se desorientado, o que poderá colocar a aeronave em situação de risco; as informações do *joystick* são coletadas e enviadas ao computador pelo WUSB (b); o computador processa as informações e executa no *Flight Simulator* os comandos provenientes do manche, enquanto o *Flight Capture* grava as informações relativas aos deslocamentos do manche (c); as informações são enviadas do computador ao monitor pelo WUSB (d), o que permite reproduzir na tela os comandos dados no manche da CREC-Ap.

Fonte: O autor (2008) com base no diagrama proposto por HAWKINS (2000).

Dentre os diversos procedimentos relacionados para checagem antes do teste, um dos mais importantes é o que promove o ajuste do sinal de transmissão da microcâmera da cadeira para o videocassete e, posteriormente, para o computador. O ajuste foi convencionado no canal oito do transmissor, sendo que o sinal transmitido da unidade foi captado por uma antena de televisão convencional (interna), conectada ao monitor de televisão de 14 polegadas (canal oito) (Figura 148). Este foi conectado ao videocassete que transmitiu o sinal ao computador, por intermédio de uma placa de captura. Antes do início do teste, o operador da CREC-Ap, que ficou sentado à mesa ao lado da cadeira, realizou algumas capturas e gravações das imagens, a partir de um aplicativo *Windows Movie Maker*, da Microsoft®.

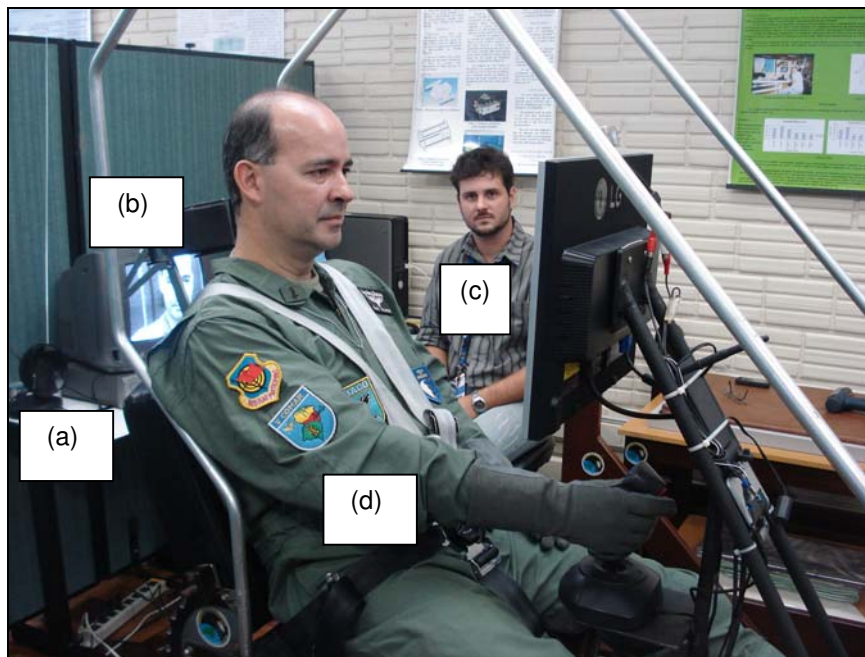


Figura 148 - Checagem da captura de imagens pela microcâmera: antena de televisão convencional (a); monitor de televisão com imagem captada pela microcâmera (b); Engenheiro Felipe Prehn Falcão operando a unidade de controle(c); autor deste trabalho testando os sistemas embarcados (d).

Fonte: O autor (2008).

Antes do início do experimento, fez-se necessário, também, executar a calibragem dos movimentos do manche, estabelecendo-se, para cada passo do manche uma correlação em graus na tela de controle do aplicativo, conforme se pode visualizar na tela da CREC-Ap, sendo, simultaneamente, capturada e transmitidas as imagens pela microcâmera, visualizadas no monitor de televisão (Figura 149).

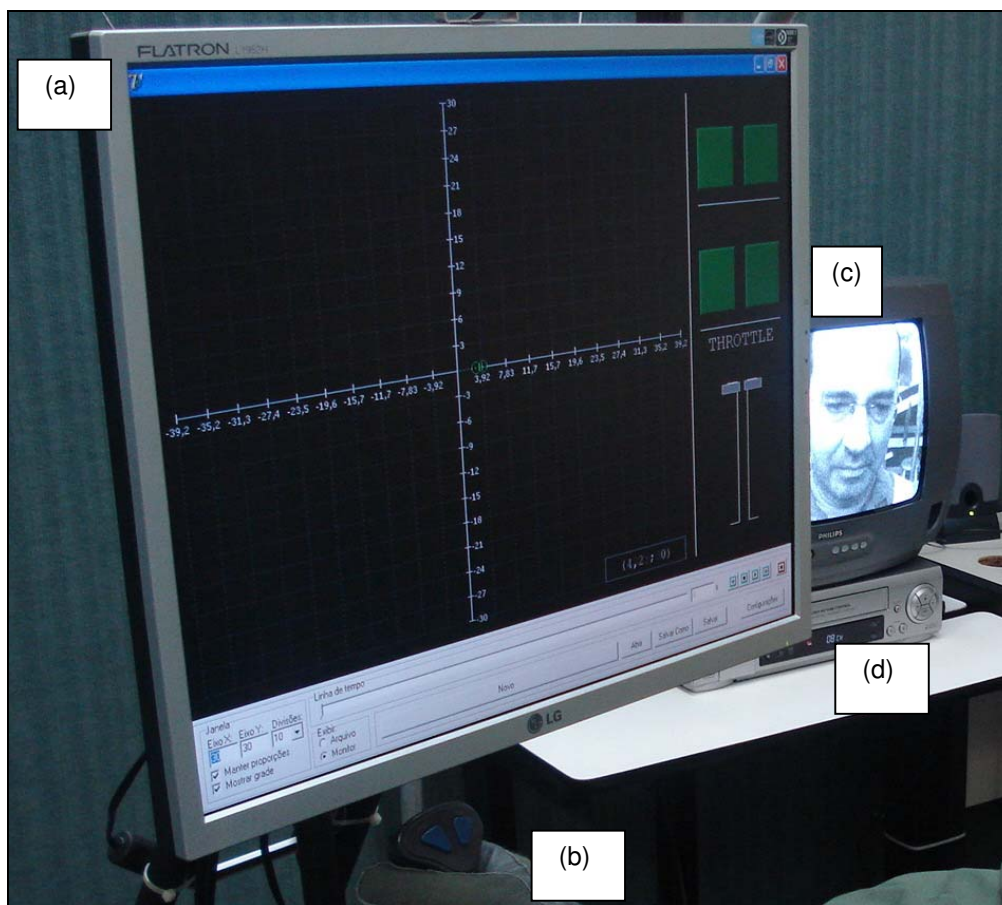


Figura 149 - Calibragem dos movimentos do manche da CREC-Ap: tela principal do *Flight Capture*, antes do “vôo” (a); mão direita do autor no manche (b); ao fundo, o monitor de televisão com a imagem do autor capturada pela microcâmara (c); videocassete (d).

Fonte: O autor (2008).

A quantificação da desorientação foi possível pelo acompanhamento e gravação dos movimentos realizados pelo manche e correlacionados à atitude de vôo no momento da desorientação, em qualquer etapa do perfil escolhido para o “vôo” (Figura 150). Tanto a desorientação pôde ser quantificada em tempo real pelo indivíduo que estava no controle da CREC-Ap, quanto, posteriormente, a partir dos sinais capturados e gravados nos arquivos gerados pelo aplicativo desenvolvido – o *Flight Capture*.



Figura 150 - “Vôo” de teste na CREC-Ap: quantificação da desorientação espacial com captura de imagens pela microcâmara (a), imagens do *Flight Simulator X* no monitor embarcado (b) e captura em tempo real dos movimentos do manche acompanhados na tela do computador da unidade de controle da cadeira pelo *Flight Capture* (c).

Fonte: Autor (2008).

Diversos perfis de vôo foram testados na CREC-Ap, a partir de diferentes aeronaves selecionadas no *Flight Simulator X*, o que demonstrou e confirmou a versatilidade da cadeira em permitir a quantificação da desorientação espacial com o *Flight Capture* (Figura 151).



Figura 151 - Imagem do *Flight Simulator X* no monitor: percebe-se o perfil selecionado de vôo com aeronave de caça com HUD.
Fonte: O autor (2008).

Os testes foram bem sucedidos, tendo sido possível quantificar a desorientação espacial (Efeito Coriolis) induzida pela estimulação simultânea de dois conjuntos de canais semicirculares.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da CREC-Ap envolveu o estudo da unidade precursora deste trabalho (Piedade, 2001) e da versão modificada (Gessinger, 2005), tendo sido incluídos, a partir desta última, diversos equipamentos, componentes e materiais, que foram integrados entre si e com a unidade de controle, de forma a permitir que se chegasse aos resultados que serão apresentados a seguir.

A CREC-Ap foi testada pelo autor deste trabalho como instrumento capaz de quantificar a desorientação espacial, demonstrando ser eficiente e eficaz. Produziu, portanto, com baixo custo, a desorientação esperada, permitindo gerar registros armazenados em arquivos específicos, o que possibilitou demonstrá-la e quantificá-la, a partir da análise de desempenhos nas diversas situações propostas de vôo, em diferentes etapas, como decolagem, navegação e pouso.

A eficiência da CREC-Ap foi demonstrada pelo adequado funcionamento de todas as soluções propostas, com baixo custo. A eficácia, por sua vez, foi obtida pela quantificação inequívoca da desorientação espacial.

Desta forma, cabe, também, uma consideração a respeito do custo-benefício da CREC-Ap, em comparação a outros instrumentos e sistemas capazes de produzir desorientação espacial. Em virtude da capacidade da CREC-Ap de gerar arquivos que permitem analisar os dados obtidos, bem como demonstrar o que teria ocorrido no vôo simulado, cumpre a função de um simulador, o que permite compará-la a estes modernos sistemas.

Inequivocamente, a CREC-Ap incorporou recursos eficientes, cujo resultado conjunto propiciou uma aplicação eficaz, pois se trata de um projeto de muito baixo custo, quando comparado aos simuladores de vôo.

Os testes realizados na cadeira pelo autor deste trabalho permitiram demonstrar o desempenho da CREC-Ap comparado a diversos outros modelos e sistemas capazes de provocar desorientação espacial (Figura 152).

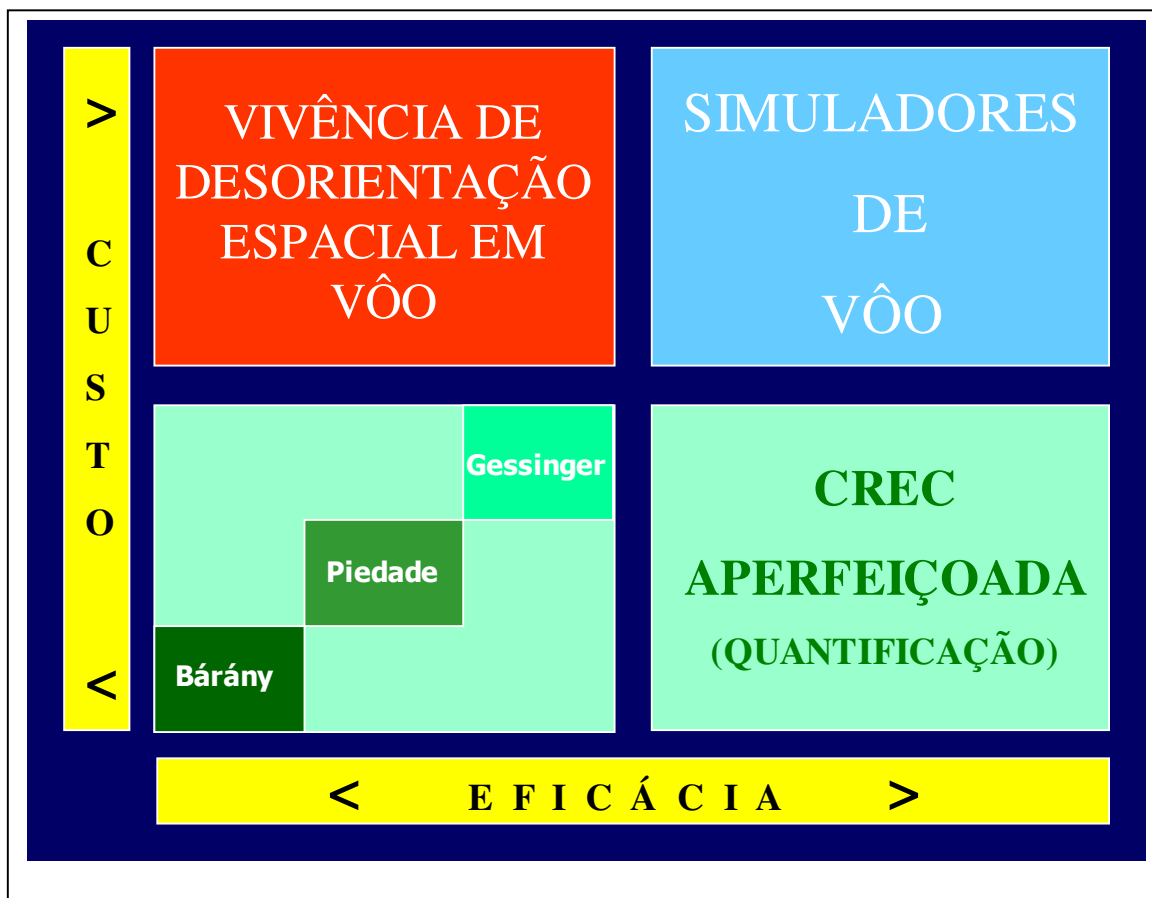


Figura 152 - Quadro comparativo da CREC-Ap. Evidencia-se o êxito do sistema proposto para quantificação da desorientação espacial, considerando-se o custo e a eficácia, em comparação a outros métodos e sistemas capazes de produzir desorientação espacial. A vivência de desorientação espacial em vôo traduz o alto custo associado à baixa eficácia na prevenção do fenômeno, pois não é possível reproduzi-lo de forma seqüencial e com avaliação de desempenho. A experimentação em simuladores de vôo, por sua vez, permite que se estabeleçam diversos perfis de vôo e se possa demonstrar a desorientação espacial, porém, com um custo elevado, o que restringe o seu uso para esta finalidade. Houve expressivo ganho, a partir da cadeira de Bárány, com o desenvolvimento da CREC proposta por Piedade (2001), que foi modificada por Gessinger (2005). Desta forma, concretizou-se a proposta de se poder contar com um instrumento eficaz e de baixo custo, a partir da CREC-Ap.

Fonte: O autor (2008).

Assim, concluiu-se que o aperfeiçoamento da cadeira, realizado como objeto desta dissertação de mestrado, alcançou os objetivos propostos:

- Confecção de uma estrutura (tubos de alumínio) leve, resistente e de baixo custo permitindo criar um ambiente com formato semelhante ao encontrado na cabine de uma aeronave de caça;

- Confeção de uma estrutura resistente (estrutura de tubos de aço) suportando a fixação de diversos componentes incorporados à cadeira e estabilização da estrutura de alumínio;
- Confeção de uma estrutura em MDF para apoiar as pernas, favorecendo o apoio dos membros inferiores;
- Confeção de uma estrutura de MDF para apoio dos pés com revestimento de borracha antiderrapante, permitindo o descanso dos mesmos de maneira firme e com ângulo adequado em relação às pernas, conferindo maior segurança ao conjunto;
- Confeção de uma cobertura em tecido emborrachado atenuando a interferência do ar, do som e da luminosidade no experimento;
- Introdução de um sistema de freio hidráulico com acionamento mecânico permitindo a parada precisa da cadeira, sem a interferência da mão humana;
- Introdução de um dispositivo semelhante ao manche de uma aeronave de caça (*joystick*) permitindo a execução dos diversos comandos em vôo;
- Desenvolvimento de um aplicativo para a captação dos sinais do manche (*joystick*) permitindo a quantificação da desorientação espacial;
- Introdução de uma microcâmera infravermelho com unidade transmissora permitindo a transmissão e o registro de imagens para acompanhamento do experimento;
- Introdução de um HUB USB sem fio (WUSB) permitindo a transmissão de sinal dos componentes que estão em rotação na cadeira para um computador localizado numa estrutura fixa;
- Introdução de um monitor com boa amplitude de tela (19 polegadas), com baixo peso e espessura reduzida (LCD) permitindo projetar-se a imagem do software de simulação de vôo no interior da cobertura da cadeira;
- Introdução de um dispositivo de expansão de portas com interface USB permitindo acoplar o monitor de vídeo (VGA) e o *joystick* para interface USB com o dispositivo HUB USB sem fio;
- Introdução de um software de simulação de vôo permitindo a execução dos diversos perfis de vôo necessários aos experimentos;

- Introdução de um conector rotativo blindado, de dois contatos, permitindo a alimentação dos componentes em rotação incorporados à cadeira;
- Introdução de uma régua para distribuição de energia elétrica aos diversos equipamentos incorporados e que sofrem rotação junto com a CREC-Ap.

Portanto, o objeto desta dissertação de mestrado demonstrou, além de representar uma iniciativa de baixo custo e simplicidade de operação, elevado potencial para ampliar a aplicação da cadeira tanto na área de educação quanto de pesquisa.

Perspectivas

Na área de educação, a CREC-Ap propiciará, a partir da quantificação da desorientação espacial, enorme potencial de aplicação no treinamento de alunos e pilotos, tanto para formação de tripulantes quanto para prevenção do fenômeno, em inúmeras instituições como: Escolas de Aviação, Aeroclubes, Academia da Força Aérea, Esquadrões de Vôo (Exército, Marinha e Aeronáutica), Companhias Aéreas, Universidades (Ciências Aeronáuticas) e Universidade da Força Aérea (Instituto de Fisiologia Aeroespacial).

De forma ainda a ser desenvolvida, na área de treinamento, abrir-se-á a possibilidade de se utilizar a capacidade de rotação da CREC-Ap para simular pane do rotor de cauda em helicópteros, o que poderia proporcionar uma ampliação significativa da aplicação deste trabalho, tanto no âmbito civil quanto militar, no que diz respeito à aviação de asas rotativas.

Já, na área da pesquisa, além de ampliar a possibilidade de realização de estudos e aplicação em tratamentos clínicos (Gessinger, 2005), a CREC-Ap poderá ser utilizada em instituições como o Centro de Microgravidade (PUCRS), permitindo que possam ser desenvolvidos outros inúmeros projetos, tendo como ponto de partida o objeto desta dissertação de mestrado (Figura 153).



Figura 153 - Autor deste trabalho durante “vôo” de teste na CREC-Ap: execução de perfil de “vôo” sem a cobertura da cadeira, a fim de que se possa visualizar o conjunto completo por dentro da estrutura.

Fonte: Autor (2008).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Belkin®. **Cable-Fre USB Hub. Manual User**. 2007. Belkin® International Inc.

BENSON, A.J. **Spatial Disorientation** – general aspects. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 277-96.

BENSON, A.J. **Spatial Disorientation** – common illusions. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 297-317.

Conector Elétrico Rotatório Dois Condutores. Mercotac®. **Rotary Electrical Connectors**. Modelo 205. 2007. Disponível em: <<http://www.mercotac.com/html/205.html>> acesso em 30 set.2007.

DEHART, R. L. **The Historical Perspective**. In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine*. 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 3-22.

ERNSTING, J. **Respiratory physiology**. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 27-44.

Efeitos dos Fatores Humanos no emprego do Helmet-Mounted Display. 2004. Disponível em: <<http://www.airpower.maxwell.af.mil/apjinternational/apj-p>> acesso em 20 jan.2007.

F-5BR. Modernização feita amplia significativamente a capacidade operacional da aeronave. Revista Albatroz, Nº 83. Escola Preparatória de Cadetes do Ar. Barbacena. Minas Gerais. 2004. p. 23-25.

GESSINGER, R. P. **Aperfeiçoamento da cadeira eletricamente controlada e seu uso no estudo do equilíbrio humano.** 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GILLINGHAM, K.K.; Previc, F.H. **Spatial Orientation in Flight.** In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine.* 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 309-97.

GRAY, H. **Gray Anatomia.** Tomo II. 35ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1979. p. 1027-1084.

GUYTON, A.C. **Fisiologia Humana.** 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 493-502; p. 555-90.

HAWKINS, F.H. **Vision and Visual Illusions in Flight.** In: Kawkins, F.H. *Human Factors in Flight.* 2nd. ed. England: Ashgate Publishing Limited, 1987. p. 107-30.

HUNGRIA, H. **Anatomia**. In: Otorrinolaringologia. Hungria, H. 8ª Ed. Editora: Guanabara Koogan. 2000. p. 299-310.

Ilusão de Ótica. 2007. Disponível em: <<http://www.ilusaodeotica.com>> acesso em 30 set.2007.

Inflight Spatial Disorientation. Humans Factors and Aviation Medicine. Flight Safety Foundation. Vol. 39 . No. 1. Disponível em: <<http://www.flightsafety.org>> acesso em 21 jan.2007.

Kensington®. **Notebook Expansion Dock with Video**. Instruction Guide. Kensington® Computer Products Group. ACCO Brands USA LLC. 2007. p. 1-16.

MACHADO, A. **Neuroanatomia Funcional**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1981. p. 233-62.

MANGABEIRA ALBERNAZ, P.L. **Elementos de Psicoacústica**. In: Munhoz, M.S.L.; Caovila, H.H.; Silva, M.L.G.; Ganança, M.M. Audiologia Clínica. São Paulo: Atheneu, 2000. p. 11-18.

Medicina Aeronáutica: Uma Componente Aérea da Saúde Militar. 2006. Disponível em: <<http://www.revistamilitar.pt/modules/articles/article.php?id=120>> acesso em 20 jan.2007.

Monitor LCD LG 19”. 2007. Disponível em: <<http://br.lg.com>> acesso em 30 set.2007.

OLIVEIRA, A. **Fisiologia Clínica da Audição**. In: Costa, S.S.; Cruz, O.L.M.; Oliveira, J.A.A. et al. Otorrinolaringologia. Princípios e Prática: a fisiologia clínica da audição. 1ª ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1994. p. 238-48.

PIEIDADE, L. A. **Cadeira de Bárány como modelo de desorientação espacial**. 2001.101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

READ, KEITH E. E. **Aeromedicine for Aviators**. 1st. ed. Shrewsbury: Airlife Publishing Ltd., 1988. p. 41-59.

RUSSOMANO, T.; AZEVEDO, D. F. G.; GESSINGER, R. P.; PIEIDADE, L. A.; PORTO, F.; GURGEL, J.; GIONGO, J. L.; SANTOS, M. A.; BECK, J. C. **Desenvolvimento e validação de simulador de desorientação espacial**. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, 2005. p. 97-103.

SANTOS, N. A.; SIMAS, M. L. B. **Percepção e Processamento Visual da Forma: Discutindo Modelos Teóricos Atuais Psicologia: Reflexão e Crítica**, 2001, 14(1), p.157-166. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prc/v14n1/5215.pdf>> acesso em 30 set.2007.

Spatial Disorientation. Federal Aviation Administration. 2007. Disponível em: <<http://www.faa.gov/pilots/safety>> acesso em 20 jan.2007.

Spatial Disorientation. Confusion that kills. Air Safety Foundation. AOPA. 2004. Disponível em: <<http://ww.aopa.org>> acesso em 21 jan.2007.

Supermanobrabilidade. 2007. Disponível em: <<http://www.flysite.com.br/> rep1> acesso em 20 jan.2007.

TREDICI, T.J. **Ophthalmology in Aerospace Medicine.** In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine.* 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 517-66.

WUSB. Guia do Hardware. **Entendendo o WUSB (Wireless USB).** 2007. Disponível em: <<http://www.guiadohardware.net:80/artigos/entendendo-wusb>> acesso em 12 ago.2007.

YARINGTON, JR., C.T.; HANNA, H.H. **Otolaryngology in Aerospace Medicine.** In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine.* 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 567-91.

APÊNDICE 1 – Artigo Científico (submetido e aceito para publicação)

**Centro de Microgravidade
PUCRS
FENG, Prédio 30, Bloco F, sala 216
Av. Ipiranga, 6681
Porto Alegre RS
90619-900
Brasil
Fone: (++ 55 51) 3320 3525
Fax: (++ 55 51) 3320 3904**

microg@pucrs.br

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA QUANTIFICAÇÃO DA
DESORIENTAÇÃO ESPACIAL**

Cloer Vescia Alves¹, Felipe Prenh Falcão¹, Thaís Russomano¹

¹Centro de Microgravidade/FENG-PUCRS, Porto Alegre, RS, Brasil.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

During normal conditions the spatial orientation in flight – the aircraft attitude in relation to the earth surface – is due to the vision sense of the pilot that keeps him oriented, using as reference the horizon, something that can be confirmed by the flight instruments. Thus, when visual references as during a flight in low visibility condition, proprioceptive and vestibular information become predominant and are susceptible to linear and angular accelerations. In these cases, when horizon is not visible, like during an instrument flight, for example, the orientation of the pilot is based only in the information that come from the aircraft instruments panel. This condition continues to determine many lost of human lives and material resources since the principles of the aviation. Even become possible improve the research in the human physiology, the studies shows that susceptibility to spatial disorientation decreases when the individual experience increases, what stimulates the pilot's training. The general context of world aviation refers that almost 10% of aeronautics accidents are caused by spatial disorientation, what represents the main problem because almost 90% are fatal ones. Despite of non adaptation the focus is prevention from the training to minimize the spatial disorientation as contributor factor in the genesis of air crash. One of the instruments more used in the world for pilot and astronaut's training to prevent spatial disorientation is the Barany's Chair. Several systems like simulators as well can reproduce flight accelerations, but with high acquisition cost besides high cost of maintenance and use. So, this paper brings the improvement of a system to quantification spatial disorientation from the Barany' Chair which resulted in accessible and low cost system.

Material

From the model developed by Gessinger (2005) which was based in the Piedade's Chair (2001) the Improved-Electrically Controlled Rotary Chair (I-ECRC) kept the rotation range from 10 rpm to 40 rpm, with maximal accidental load of 100 kg and no nominal variation of the acceleration during rotation. The following components and characteristics were kept: the DC motor (24 V) to promote its rotation; the nominal rotation of the motor is 3000 rpm; a reducer was used to decrease it by a factor of 15:1; the transmission of the movement between the motor and the chair is given by two trapezoidal canal pulleys and an A29 model chain with a reduction of 5:1. A digital tachometer was developed and consists of a micro controlled conversion system (model 89C2051) that converts an analogical signal to a number. Several new items were incorporated: aluminum structure, steel structure, a cover, hydraulic brake, joystick, an application to capture and quantify signs of disorientation, micro-camera, wireless USB HUB, video monitor, USB ports expander, flight simulator software, rotating connector and device for distribution of electric energy.

Results

The components incorporated to the I-ECRC showed adequate function in all tests done what has permitted the quantification of the spatial disorientation as objective of this dissertation, besides to capture signs from the joystick including the visualization of the points (x and y) in the screen during the experiment in every moment. The applicative has permitted to establish different forms of parameters including the exact point of joystick in relation to neutral position and each movement what becomes possible to compare performances including the correlation with the aircraft attitude. It

showed the efficiency and effectiveness of I-ECRC to improve prevention based on the training. The quantification of disorientation was showed unequivocally.

Discussion

The integration of different dispositive and systems became possible to process and keep all information as expected including some adjusts in the screen resolution for future experiments mainly to avoid lost of performance. The images captured by the micro camera could be processed to register the pilot's reaction associated with the joystick movements. The tests applied to the I-ECRC has permitted to check the full use of the system as became possible verify all functions to stimulate simultaneously two groups of semicircular channel (forward and lateral) to create Coriolis' Effect. The quantification was showed by accomplishing and recording data with relation to the movement executed in the joystick reflecting the aircraft attitude in anytime of the experiment.

Conclusion

The I-ECRC was tested by the author as instrument capable to determine the quantification of spatial disorientation with low cost. It's possible assure that I-ECRC has worked like a flight simulator in comparison to other instruments and systems used to create spatial disorientation. Unequivocally the I-ECRC incorporated efficient resources whose result gave it an application to education and research area.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA QUANTIFICAÇÃO DA DESORIENTAÇÃO ESPACIAL

Este artigo descreve o desenvolvimento da Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada - Aperfeiçoada (CREC-Ap), a partir do modelo modificado por Gessinger (2005), cuja base foi a dissertação de mestrado de Piedade (2001), sendo ambos os trabalhos desenvolvidos no então Laboratório de Microgravidade, do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas (IPCT), da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Foram incorporados diversos itens: estrutura de alumínio, estrutura de aço, cobertura, freio hidráulico, manche, aplicativo para captação de sinais e quantificação da desorientação, microcâmera, HUB USB sem fio, monitor de vídeo, expensor de portas USB, *software* de simulador de vôo, conector rotativo e régua de distribuição de energia elétrica. A base teórica traz a revisão bibliográfica a respeito da fisiologia relacionada à desorientação espacial, bem com aspectos detalhados da gênese deste fenômeno e suas implicações na atividade aérea, com o foco na segurança de vôo, a partir da prevenção. A seguir, são apresentados os materiais e métodos utilizados, trazendo na seqüência os resultados e discussões a respeito dos aperfeiçoamentos propostos, concluindo-se que a CREC-Ap proporcionará ampla aplicação, por ser de baixo custo, tanto na aérea de educação quanto de pesquisa, em prol da segurança de vôo.

Palavras-chave: Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap). Fisiologia do equilíbrio e da orientação. Desorientação espacial. Prevenção. Segurança de vôo.

IMPROVEMENT OF A SYSTEM TO QUANTIFICATION SPATIAL DISORIENTATION

This paper describes the development of the Improved-Electrically Controlled Rotary Chair (I-ECRC), from the model previously modified by Gessinger (2005), who in turn based developments on the Masters dissertation of Piedade (2001), both having been developmental works carried out in Microgravity Laboratory, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUCRS). Several new items were incorporated: aluminum structure, steel structure, a cover, hydraulic brake, joystick, an application to capture and quantify signs of disorientation, micro-camera, wireless USB HUB, video monitor, USB ports expander, flight simulator software, rotating connector and device for distribution of electric energy. The theory basis brings the bibliographic review of the physiology related to spatial disorientation, as well detailing aspects of this phenomenon and implications in aerial activity, with the focus in the flight safety, from the prevention. In the sequence, materials and methods are presented, followed by the results and discussions of the proposed improvements, concluding that I-ECRC, being a low cost device, will bring large application to education and research in order to improve the flight safety

Key words: Improved-Electrically Controlled Rotary Chair (I-ECRC). Physiology of the equilibrium and orientation. Spatial disorientation. Prevention. Flight Safety.

Introdução

Em condições normais, a orientação espacial no vôo – a atitude da aeronave em relação à superfície terrestre – se dá em função do sentido da visão do piloto que o mantém orientado, tendo como referência a linha do horizonte, o que pode ser confirmado pelos instrumentos da aeronave. No entanto, quando as referências visuais se tornam prejudicadas, como em vôos com baixa visibilidade, passa a existir predomínio das informações provenientes do sistema proprioceptivo e do sistema vestibular, susceptíveis às acelerações (lineares e angulares). Nessa condição, quando o horizonte terrestre não está visível, a exemplo do que ocorre no vôo por instrumentos, a orientação do piloto se mantém a partir das informações provenientes do painel de instrumentos da aeronave. Apesar de não haver qualquer tipo de adaptação fisiológica possível à desorientação espacial, ainda que se possa avançar no conhecimento profundo da fisiologia humana, os estudos apontam que há menor susceptibilidade à desorientação espacial quanto maior a vivência do indivíduo, o que estimula o treinamento dos pilotos (READ, 1988). O contexto geral da aviação mundial refere que cerca de 10% dos acidentes aéreos têm como causa preponderante a desorientação espacial, o que representa enorme preocupação, principalmente, porque destes cerca de 90% são fatais. Frente à impossibilidade de adaptação fisiológica, o foco reside, então, na área da prevenção desse fenômeno, a partir do treinamento, no sentido de minimizar a participação da desorientação espacial na gênese de acidentes aéreos (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Um dos instrumentos mais utilizados no mundo para treinar pilotos e astronautas para prevenir a ocorrência de desorientação espacial é a Cadeira de Bárány, que provoca aceleração angular idêntica à que ocorre em vôo. Diversos sistemas, como os

simuladores de vôo, podem reproduzir as acelerações encontradas em vôo, porém, com elevado custo de aquisição, de manutenção e de utilização (GILLINGHAM; PREVIC, 1996).

Desta forma, este trabalho propõe um sistema baseado na Cadeira de Bárány para quantificar a desorientação espacial a partir do aperfeiçoamento de uma Cadeira Eletricamente Controlada (CREC), desenvolvida por Piedade (2001), em sua Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), que foi modificada por Gessinger (2005), também em sua Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica na PUCRS.

Materiais e Métodos

A partir do modelo modificado por Gessinger (2005) (Figura 1), que teve como base a cadeira desenvolvida por Piedade (2001), foram estabelecidas três etapas para este trabalho. Os seguintes componentes e características foram mantidos: eixo rotatório com os componentes do sistema do motor; conjunto propulsor com motor elétrico de corrente contínua 24V, que apresenta rotação nominal de 3000 rotações por minuto (rpm) com um redutor com fator de redução de 15:1; transmissão de movimento entre o motor e o eixo por meio de duas polias de canal trapezoidal e uma correia de perfil trapezoidal modelo "A29", cuja relação estabelecida é de 5:1. A rotação final do sistema foi calculada pela expressão: $R_f = [(R_m/r) / R_p]$. Onde: R_f : rotação final; R_m : rotação do motor; r : fator do redutor; R_p : relação das polias. Logo $R_f = (3000/15)/5$ – a rotação nominal é $R_f = 40,0$ rpm. O controle da rotação baseou-se em um circuito eletrônico com uma entrada de 220 Vca e uma saída ajustável de 24 Vcc. (controle da tensão de saída para controlar a velocidade de rotação), sendo a sua variação efetuada através de um circuito de PWM de 24V, modulado a 10Hz, com capacidade de

disponibilizar até 10A e ajustado por um potenciômetro. Um tacômetro digital foi desenvolvido para medir a velocidade da CREC em rotações por minuto (rpm). Este dispositivo consiste em um gerador (dínamo) que foi acoplado na relação de 1:1 ao eixo do motor da cadeira através de uma correia denteada. Desta forma, ao se girar o gerador, uma tensão foi induzida e, através de um microcontrolador 89C2051, o sinal foi adquirido, processado por um software em *Assembly* e indicado em dois blocos de *leds* de sete segmentos. As especificações finais da cadeira foram: patamar de rotação de 10-40 rpm, carga acidental máxima de 100 kg, tempo estimado de teste de 20-30 minutos e variação da aceleração no patamar teste 0 Rad/s². A base possui um diâmetro de 970 mm e altura de 250 mm, sendo que sua superfície externa foi revestida com forração automotiva. O isolamento acústico foi possível pelo revestimento do interior da base com espuma acústica de densidade 20 (D 20), com 3 cm de espessura (2 cm de base e 1 cm de mamilo). Um sistema de trava dentada foi fixado nos dois lados do assento proporcionando maior estabilidade e segurança, sendo utilizado um pino de aço de cada lado do espaldar da cadeira, que se encaixa no dente da trava, determinando assim o ângulo.

Etapa I – Incorporação de dispositivos e componentes à CREC-Ap.

Diversos dispositivos e componentes foram desenvolvidos para o propósito deste trabalho ou adaptados a partir de soluções preexistentes no mercado.

Estrutura em alumínio

Uma estrutura de alumínio (Figura 2) com barras tubulares (19 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura) criou um arcabouço, a partir de medidas obtidas numa aeronave F-5 M Tiger II, da Força Aérea Brasileira.

Estrutura em aço

Uma estrutura em tubos de aço (19 mm de diâmetro externo e 2 mm de espessura) foi desenvolvida para servir de arcabouço da CREC-Ap (Figura 2).

Estrutura para apoio das pernas e dos pés

Uma estrutura em MDF (8 mm) foi desenvolvida para apoiar as pernas e outra para apoio dos pés, sendo a peça de apoio aos pés revestida com lâminas de borracha antiderrapante.

Cobertura

Confeccionada em curvim emborrachado (*blackout*), na cor bege, objetivando minimizar a influência do meio externo (som, ar e, principalmente, luminosidade), além de simular um *cockpit*, com dimensões aproximadas às da aeronave F-5 M, sendo que foi inserida uma abertura com zíper do lado esquerdo, a fim de permitir fácil acesso.

Sistema de freio hidráulico

Um sistema de freio hidráulico de motocicleta foi incorporado. Por questão de segurança, a fim de assegurar o afastamento do operador em relação à CREC-Ap, utilizou-se uma extensão de mangueira de pressão para fluido hidráulico, para acionamento do freio pelo pedal à distância. O conjunto de acionamento do freio consta de um pedal, um reservatório de fluido hidráulico, uma extensão de mangueira de pressão, um punho metálico, fixados ao piso. O conjunto de freio consta de disco e pinça completa, tendo sido instalado logo abaixo do assento, a fim de garantir fácil acesso para manutenção e melhor distribuição do peso. A fixação se deu por duas peças metálicas: uma de alumínio, em formato de “L”, colocada de forma invertida, com fixação vertical; outra, de ferro, em formato de “T”, com fixação vertical e horizontal. A peça em “T” acompanha a curvatura do cone colocada de forma justaposta, por cima da peça em “L”, ambas fixadas ao cone por parafusos. (Figura 3).

Manche do comando de vôo

O *joystick* apresenta semelhança com o manche da aeronave F-5 cumprindo assim a finalidade desejada, tendo sido escolhido o *joystick* Genius MaxFighter F-16U, com interface USB, como a mais adequada solução encontrada, considerando-se a relação custo-benefício.

Aplicativo para quantificação da desorientação espacial

O aplicativo desenvolvido (*Flight Capture*) captura e armazena os movimentos do manche, como um *joystick* comum durante a utilização do *Flight Simulator X*, da Microsoft®. Foi desenvolvido em *delphi* usando-se o compilador da Borland - Delphi 7, utilizando-se um componente de controle *ActiveX freeware DelphiX*, para possibilitar a comunicação através da porta USB do computador, com amostragem de aproximadamente 50 capturas por segundo. Como a utilização é simultânea com o *Flight Simulator*, o programa não precisa estar com a janela em primeiro plano para a captura de dados. Seleciona-se pela tela de configurações a função de cada botão e também o limite máximo de movimento que se consegue alcançar nos eixos x e y, em graus. Informa-se esses dados apenas uma vez, pois o programa gera o arquivo “configuracoes.ini”, salvo automaticamente. Quando o programa é iniciado as configurações são buscadas nesse arquivo. Após a gravação, é gerado um arquivo no formato texto, em que consta a configuração dos botões, e também todos os pontos capturados, de acordo com o seguinte formato (as variáveis estão separadas por tabulação):

eixo_x eixo_y throttle botao_1 botao_2 botao_3 botao_4 tempo

A tela principal do *Flight Capture* (Figura 4) pode ser dividida em duas partes: o controle (pontos 1, 2, 3, 4 e 5) onde o usuário pode acessar todas as funcionalidades

do programa; e o *display* (pontos 6, 7, 8, e 9), que é utilizado para a visualização de um arquivo ou monitoração do *joystick*.

Quantificação da desorientação espacial

A partir da captura dos sinais é possível visualizar na tela do aplicativo os pontos dispostos em dois eixos (x e y), permitindo o estabelecimento de diversas formas de parametrização, a partir de calibragem com o máximo deslocamento do manche à frente e para trás, bem como para os lados, indicando exatamente em que posição estava o manche da aeronave, em relação ao ponto neutro, em cada etapa do experimento. Assim, se pode precisar e comparar desempenhos a partir da captação dos sinais provenientes do manche, além de se correlacionar estes dados com a atitude de vôo imposta à aeronave ao cruzar os dados com os do *Flight Simulator*, permitindo verificar a efetividade das ações executadas no comando de vôo, de forma a comparar os diversos desempenhos e resultados.

Microcâmara Infravermelho e unidade transmissora VHF

Uma microcâmara infravermelho, alimentada por bateria, capta imagens do interior da CREC-Ap, mesmo com pouca luminosidade, transmitindo os sinais ao monitor por ondas em frequência VHF, por um vídeo link, sendo captadas por uma antena convencional. Um monitor de televisão (14 polegadas) conecta-se ao vídeo cassete, ligado à placa de captura do computador. A opção de utilização de um videocassete permite, também, a redundância da gravar em VHS. Um software de captura (*Windows Movie Maker*) armazena as imagens em formato digital (*wmv*) para reprodução. O consumo de energia do vídeo link é de 280 mA.

Sistema HUB USB sem fio (WUSB)

O WUSB (*Wireless USB*) transmite sinais de baixa potência a curtas distâncias, interligando aparelhos no mesmo ambiente, sem que haja obstáculos importantes, permitindo enviar/receber sinais (monitor e *joystick*), conectados a um expensor de portas com interface USB. O sistema utilizado foi o Belkin®, cujo consumo de energia é de 100 mA.

Monitor de vídeo LCD de 19 polegadas

Utilizou-se um LCD Flatron L 1950H de 19 polegadas da LG com resolução máxima de 1280 x 1024 (75Hz) com *pixel pitch* de 0,294; auto-ajuste de voltagem de 100 ~ 240VAC (50/60Hz); peso de 4,1 kg e a potência de 37 W, sendo de 0,8 A o consumo de energia.

Dispositivo de expansão de portas com interface USB

Integrando diferentes conexões, utilizou-se um dispositivo da Kensington® com expansão para quatro portas USB 2.0 de alta velocidade, porta para monitor de vídeo (VGA), porta para *ethernet* e interface para conexão USB; consumo de energia de 100 mA.

Software de Simulador de Vôo (*Flight Simulator*)

A opção foi utilizar o *software Flight Simulator X*, da Microsoft®, compatibilizando-o com a taxa de transmissão do WUSB.

Conector rotativo para alimentação elétrica

A alimentação elétrica dos componentes embarcados se dá por conector rotativo blindado, Mercotac®, de dois contatos, com capacidade para 4A, montado verticalmente na parte inferior do eixo de rotação da CREC-Ap.

Réguas para distribuição de energia elétrica

Uma régua com filtro de linha foi instalada na parte posterior da cadeira para distribuição da energia elétrica ao monitor, expensor de portas, unidade HUB USB sem fio e para unidade transmissora de rádio (microcâmera), alimentada pelo conector rotativo por intermédio de um cabo de força que passa por dentro do eixo central de rotação da CREC-Ap.

Etapa II - Integração dos Dispositivos e Sistemas da CREC-Ap com a unidade de controle (monitor de televisão, videocassete e computador)

A integração dos diversos dispositivos e sistemas com um computador permitiu processar e armazenar as informações para posterior utilização. O sinal da microcâmera foi transmitido pelo vídeo link e captado pela antena de televisão, sendo que as imagens foram gravadas tanto pelo *software* quanto em VHS. O monitor de televisão permitiu a visualização em tempo real. O computador foi bem dimensionado contando com processador de 2.2 GHz, com placa de vídeo com 512 MB de memória RAM, disco rígido com capacidade de 160 GB e memória RAM de 1,96 GB). A unidade receptora do sistema WUSB foi conectada a uma extensão que permitiu a fixação logo abaixo da cadeira, ligando-se ao computador. O computador executou o *Flight Simulator X*, o *Flight Capture* e gravou as imagens da microcâmera em formato *wmv*, o que permitiu processar todas as informações provenientes destes sistemas para posterior aplicação na quantificação da desorientação espacial.

Etapa III - Testes com a Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap)

Ao término da etapa de integração das diversas interfaces dos vários componentes e sistemas da CREC-Ap, o autor deste trabalho efetuou diversos testes

que foram satisfatórios quanto ao funcionamento dos sistemas, tendo sido realizados alguns perfis de treinamento (Efeito Coriolis) para gravação dos dados no computador.

Resultados e Discussões

Os resultados e discussões estão apresentados em três etapas:

- Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada;
- Etapa II - Integração dos dispositivos e sistemas da CREC-Ap com as diversas interfaces;
- Etapa III - Testes com a CREC-Ap.

Etapa I - Cadeira Rotatória Eletricamente Controlada-Aperfeiçoada (CREC-Ap);

A estrutura de alumínio permitiu melhor ambiência nos testes, assim como a estrutura em tubos de aço funcionou como arcabouço e suportou a instalação de diversos componentes, além de ter proporcionado a fixação da estrutura de alumínio, o que permitiu a rotação da CREC-Ap sem oscilações ou ruídos adicionais. As estruturas em MDF proporcionaram maior firmeza e estabilidade para membros inferiores, permitindo o descanso dos mesmos, em posição ergonômica. O revestimento de borracha antiderrapante se mostrou eficaz, não permitindo deslizar os pés sobre a superfície, o que conferiu maior segurança ao conjunto. A cobertura com tecido emborrachado (*blackout*) minimizou a influência do meio externo e a abertura lateral com zíper facilitou o acesso. O sistema de freio hidráulico funcionou adequadamente permitindo a parada instantânea da cadeira nas diferentes etapas do experimento, além de ter proporcionado maior precisão neste procedimento do que a mão humana. O *joystick* cumpriu a finalidade desejada, permitindo efetuar todos os comandos necessários durante os testes. O aplicativo desenvolvido (*Flight Capture*) permitiu

capturar e armazenar os movimentos realizados pelo manche durante as experimentações dos testes, integrando-se perfeitamente ao *Flight Simulator X*, da Microsoft®. A utilização do aplicativo foi feita de forma simultânea com o *Flight Simulator* e permitiu a adequada captura de dados, além de ter possibilitado configurar e selecionar a função de cada botão do manche. Tal procedimento possibilitou ajustar (calibração) os limites máximos de movimento nos eixos x e y, em graus, gerando arquivos “configuracoes.ini”, que foram salvos automaticamente. A gravação dos dados gerou arquivo no formato texto (txt), constando a configuração dos botões, e também todos os pontos capturados durante o experimento, o que possibilitou quantificar a desorientação espacial em quaisquer etapas do experimento. A tela principal do *Flight Capture* permitiu acessar todas as funcionalidades do programa. O resultado quanto à quantificação da desorientação espacial foi adequado ao objetivo deste trabalho, sendo que o sistema permitiu a captura dos sinais do manche, tendo sido possível visualizar na tela do aplicativo os pontos dispostos nos dois eixos (x e y), em todos os movimentos executados pelo manche, nas diversas etapas do experimento. O aplicativo permitiu estabelecer diversas formas de parametrização, indicando exatamente em que posição estava o manche da aeronave, em relação ao ponto neutro, em cada etapa do experimento, comparando-se desempenhos, além de se correlacionar estes dados com a atitude de vôo imposta à aeronave ao cruzar os dados com os do *Flight Simulator*, demonstrando a eficiência e eficácia da CREC-Ap, em prol da prevenção baseada no treinamento. A quantificação da desorientação foi demonstrada, de forma inequívoca. As imagens captadas pela microcâmera permitiram o acompanhamento dos testes, com imagens em preto-e-branco. O HUB USB sem fio (*Wireless USB*) permitiu a transmissão e recepção dos sinais, tanto do monitor quanto

do manche, estes conectados ao expensor de portas com interface USB, obtendo-se máximo aproveitamento possível na transmissão destes sinais, minimizando as interferências. O monitor LCD de 19 polegadas permitiu a adequada visualização das imagens tanto do *Flight Capture* quanto do *Flight Simulator X*. O dispositivo de expansão de portas com interface USB permitiu acoplar o monitor de vídeo (VGA) e o *joystick*, sendo que o conjunto funcionou satisfatoriamente, transmitindo os sinais a estes componentes e destes ao computador. A opção pelo *software Flight Simulator X* da Microsoft® foi adequada, o que viabilizou a reprodução da configuração da aeronave desejada, compatibilizando-a com a taxa de transmissão do WUSB. A alimentação elétrica dos equipamentos embarcados na cadeira foi proporcionada pelo conector rotativo blindado Mercotac®, de dois contatos, com capacidade para 4A, sendo que o consumo total dos componentes ficou em 1,3 A. A régua com filtro de linha permitiu a distribuição da energia elétrica para os diversos componentes embarcados, tendo sido alimentada pelo conector rotativo por intermédio de um cabo de força que foi passado por dentro do eixo central da CREC-Ap.

Etapas II - Integração dos dispositivos e sistemas da CREC-Ap com as diversas interfaces da unidade de controle

A integração dos diversos dispositivos e sistemas com o monitor de televisão/videocassete e com computador permitiu processar e armazenar as informações conforme o esperado (Figura 6).

A unidade receptora do WUSB foi conectada ao computador enviando e recebendo dados do *Flight Simulator X* e do *Flight Capture*. As imagens da microcâmera foram gravadas em formato *wmv*. O processamento das informações permitiu a posterior aplicação para quantificação da desorientação espacial, a partir da

demonstração dos movimentos efetuados no manche nas diversas etapas do experimento com imagens captadas pelo monitor de televisão, a partir da microcâmera (Figura 5).

Etapas III - Testes com a CREC-Ap

Os testes efetuados na cadeira permitiram checar a utilização plena dos sistemas, bem como fazer ajustes necessários ao adequado funcionamento da mesma, tendo sido realizada estimulação simultânea de dois conjuntos de canais semicirculares (anterior e lateral), de forma a provocar o Efeito de Coriolis. A quantificação da desorientação foi possível pelo acompanhamento e gravação dos movimentos realizados pelo manche e correlacionados à atitude de vôo no momento da desorientação, em qualquer etapa do perfil escolhido para o “vôo”. Tanto a desorientação pôde ser percebida em tempo real pelo indivíduo dentro da CREC-Ap, quanto, posteriormente, a partir dos sinais capturados e gravados nos arquivos gerados pelo aplicativo desenvolvido – o *Flight Capture*.

Conclusões

O desenvolvimento da CREC-Ap envolveu o estudo da unidade precursora deste trabalho (Piedade, 2001) e da versão modificada (Gessinger, 2005), tendo sido incluídos, a partir desta última, diversos equipamentos, componentes e materiais, que foram integrados entre si e com uma interface computadorizada, de forma a permitir que se chegasse aos resultados que serão apresentados a seguir. A CREC-Ap foi testada pelo autor deste trabalho como instrumento capaz de quantificar a desorientação espacial – demonstrando ser eficiente e eficaz – ao produzir, com baixo custo, a desorientação esperada gerando registros armazenados em arquivos

específicos, o que permitiu demonstrá-la e quantificá-la a partir da análise de desempenhos em diversas situações propostas de vôo, em diferentes etapas, como decolagem, navegação e pouso. A eficiência da CREC-Ap foi demonstrada pelo adequado funcionamento de todas as soluções propostas. Assim, cabe, também, uma consideração a respeito do custo-benefício, em comparação a outros instrumentos e sistemas para se produzir desorientação espacial e se poder analisar os dados obtidos, bem como demonstrar o que teria ocorrido em vôo, cumprindo a função de um simulador. Inequivocamente, a CREC-Ap incorporou recursos eficientes, cujo resultado conjunto propiciou uma aplicação eficaz, pois se trata de um projeto de muito baixo custo, quando comparado aos simuladores de vôo. Os testes realizados na cadeira pelo autor deste trabalho permitiram compará-la a diversos outros modelos e sistemas capazes de provocar desorientação espacial (Figura 6).

Desta forma, a CREC-Ap, além de representar uma iniciativa de baixo custo e simplicidade de operação, demonstrou elevado potencial para ampliar a aplicação tanto na área de educação quanto de pesquisa. Na área de educação, a CREC-Ap demonstrou, a partir da quantificação da desorientação espacial, enorme potencial de aplicação no treinamento de alunos e pilotos em inúmeras instituições como: Escolas de Aviação, Aeroclubes, Academia da Força Aérea, Esquadrões de Vôo (Exército, Marinha e Aeronáutica), Companhias Aéreas, Universidades (Ciências Aeronáuticas) e Universidade da Força Aérea (Instituto de Fisiologia Aeroespacial). De forma ainda a ser desenvolvida, na área de treinamento, abre-se a possibilidade de se utilizar a capacidade de rotação da CREC-Ap para simular pane do rotor de cauda em helicópteros. Já, na área da pesquisa, além de ampliar a possibilidade de realização de estudos e tratamentos na área clínica (Gessinger, 2005), a CREC-Ap pode ser aplicada

em instituições como o Centro de Microgravidade (PUCRS), permitindo que sejam desenvolvidos outros inúmeros projetos, a partir do objeto deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Belkin®. **Cable-Fre USB Hub. Manual User**. 2007. Belkin® International Inc.
BENSON, A.J. **Spatial Disorientation** – general aspects. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 277-96.
2. BENSON, A.J. **Spatial Disorientation** – common illusions. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 297-317.
3. Conector Elétrico Rotatório Dois Condutores. Mercotac®. **Rotary Electrical Connectors**. Modelo 205. 2007. Disponível em: <<http://www.mercotac.com/html/205.html>> acesso em 30 set.2007.
4. DEHART, R. L. **The Historical Perspective**. In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine*. 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 3-22.
5. ERNSTING, J. **Respiratory physiology**. In: Ernsting, J.; King, P. *Aviation Medicine*. 2nd. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 27-44.
6. **Efeitos dos Fatores Humanos no emprego do Helmet-Mounted Display**. 2004. Disponível em: <<http://www.airpower.maxwell.af.mil/apjinternational/apj-p>> acesso em 20 jan.2007.
7. **F-5BR. Modernização feita amplia significativamente a capacidade operacional da aeronave**. Revista Albatroz, Nº 83. Escola Preparatória de Cadetes do Ar. Barbacena. Minas Gerais. 2004. p. 23-25.
8. GESSINGER, R. P. **Aperfeiçoamento da cadeira eletricamente controlada e seu uso no estudo do equilíbrio humano**. 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em

- Engenharia Biomédica) – Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
9. GILLINGHAM, K.K.; Previc, F.H. **Spatial Orientation in Flight**. In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine*. 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 309-97.
 10. GRAY, H. **Gray Anatomia**. Tomo II. 35ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1979. p. 1027-1084.
 11. GUYTON, A.C. **Fisiologia Humana**. 7ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Interamericana, 1989. p. 493-502; p. 555-90.
 12. HAWKINS, F.H. **Vision and Visual Illusions in Flight**. In: Kawkins, F.H. *Human Factors in Flight*. 2nd. ed. England: Ashgate Publishing Limited, 1987. p. 107-30.
 13. HUNGRIA, H. **Anatomia**. In: *Otorrinolaringologia*. Hungria, H. 8ª Ed. Editora: Guanabara Koogan. 2000. p. 299-310.
 14. **Ilusão de Ótica**. 2007. Disponível em: <<http://www.ilusaodeotica.com>> acesso em 30 set.2007.
 15. **Inflight Spatial Disorientation. Humans Factors and Aviation Medicine**. Flight Safety Foundation. Vol. 39 . No. 1. Disponível em: <<http://www.flightsafety.org>> acesso em 21 jan.2007.
 16. Kensington®. **Notebook Expansion Dock with Video**. Instruction Guide. Kensington® Computer Products Group. ACCO Brands USA LLC. 2007. p. 1-16
 17. MACHADO, A. **Neuroanatomia Funcional**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 1981. p. 233-62.

18. MANGABEIRA ALBERNAZ, P.L. **Elementos de Psicoacústica**. In: Munhoz, M.S.L.; Caovila, H.H.; Silva, M.L.G.; Ganança, M.M. *Audiologia Clínica*. São Paulo: Atheneu, 2000. p. 11-18.
19. **Medicina Aeronáutica: Uma Componente Aérea da Saúde Militar**. 2006. Disponível em: <<http://www.revistamilitar.pt/modules/articles/article.php?id=120>> acesso em 20 jan.2007.
20. **Monitor LCD LG® 19”**. 2007. Disponível em: <<http://br.lg.com>> acesso em 30 set.2007.
21. OLIVEIRA, A. **Fisiologia Clínica da Audição**. In: Costa, S.S.; Cruz, O.L.M.; Oliveira, J.A.A. et al. *Otorrinolaringologia. Princípios e Prática: a fisiologia clínica da audição*. 1ª ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1994. p. 238-48.
22. PIEDADE, L. A. **Cadeira de Bárány como modelo de desorientação espacial**. 2001.101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
23. READ, KEITH E. E. **Aeromedicine for Aviators**. 1st. ed. Shrewsbury: Airlife Publishing Ltd., 1988. p. 41-59.
24. RUSSOMANO, T.; AZEVEDO, D. F. G.; GESSINGER, R. P.; PIEDADE, L. A.; PORTO, F.; GURGEL, J.; GIONGO, J. L.; SANTOS, M. A.; BECK, J. C. **Desenvolvimento e validação de simulador de desorientação espacial**. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 2005. p. 97-103.
25. SANTOS, N. A.; SIMAS, M. L. B. **Percepção e Processamento Visual da Forma: Discutindo Modelos Teóricos Atuais Psicologia: Reflexão e Crítica**, 2001, 14(1),

- p.157-166. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prc/v14n1/5215.pdf>> acesso em 30 set.2007.
26. **Spatial Disorientation. Confusion that kills.** Air Safety Foundation. AOPA. 2004. Disponível em: <<http://www.aopa.org>> acesso em 21 jan.200725.
27. **Spatial Disorientation.** Federal Aviation Administration. 2007. Disponível em: <<http://www.faa.gov/pilots/safety>> acesso em 20 jan.2007.
28. **Supermanobrabilidade.** 2007. Disponível em: <<http://www.flysite.com.br/rep1>> acesso em 20 jan.2007.
29. TREDICI, T.J. **Ophthalmology in Aerospace Medicine.** In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine.* 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 517-66.
30. WUSB. Guia do Hardware. **Entendendo o WUSB (Wireless USB).** 2007. Disponível em: <<http://www.guiadohardware.net:80/artigos/entendendo-wusb>> acesso em 12 ago.2007.
31. YARINGTON, JR., C.T.; HANNA, H.H. **Otolaryngology in Aerospace Medicine.** In: DeHart, R.L. *Fundamentals of Aerospace Medicine.* 2nd. ed. Baltimore: William & Willins, 1996. p. 567-91.

FIGURAS

Figura 1: Estrutura da CREC (Gessinger, 2005). *Structure of Electrically Controlled Rotary Chair (ECRC).*

Figura 2: Estrutura de aço. *Steel structure.*

Figura 3: Freio hidráulico. *Hydraulic brake.*

Figura 4: *Flight Capture. Flight Capture.*

Figura 5: CREC-Ap sem cobertura. *I-ECRC without cover.*

Figura 6: Aplicação da CREC-Ap. *I-ECRC Application.*

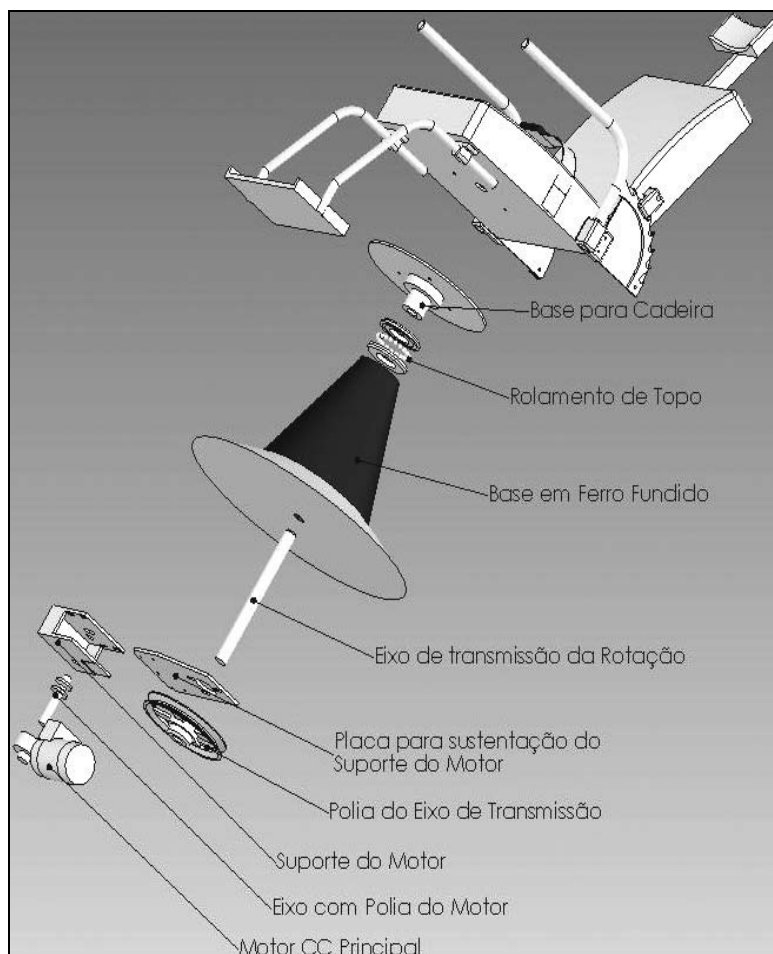


Figura 1: Estrutura da CREC (Gessinger, 2005). / *Structure of Electrically Controlled Rotary Chair (ECRC).*

Fonte: http://www.sbeb.org.br/rbeb/artigos/rev21/n2-3/art-c_21_2-3.pdf

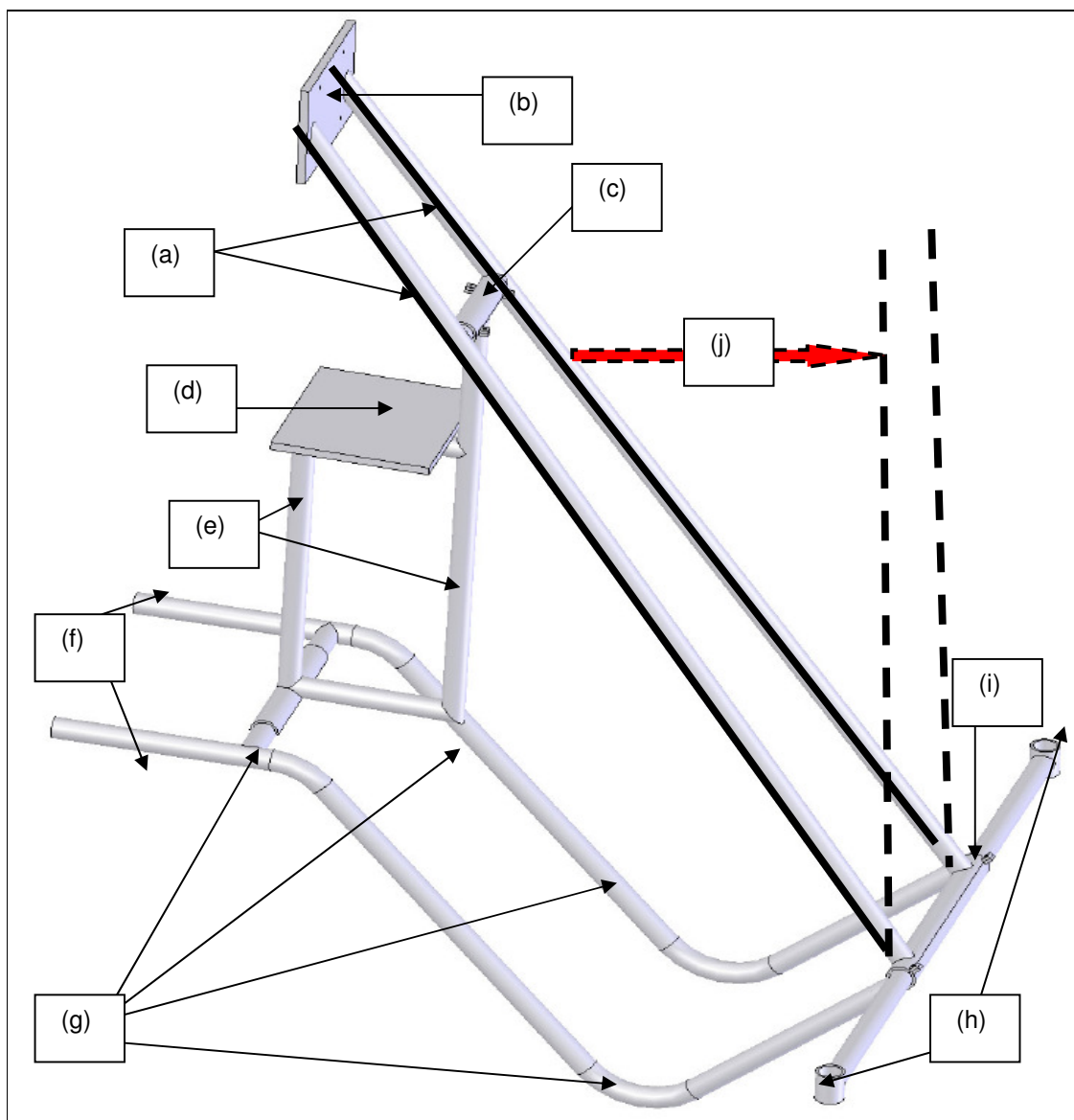


Figura 2: Estrutura de aço: tubos frontais (a); placa vertical de fixação do monitor LCD (b); engate (c); placa horizontal do manche (d); tubos verticais (e); tubos de fixação da estrutura à base da cadeira (f); tubos da parte inferior (g); encaixes para a estrutura de alumínio (h); tubo transversal (i); seta pontilhada e linhas pontilhadas indicando o sentido do movimento de bascula do conjunto frontal (j). Fonte: Desenho desenvolvido pelo Engenheiro Felipe Prehn Falcão. / *Steel structure*.

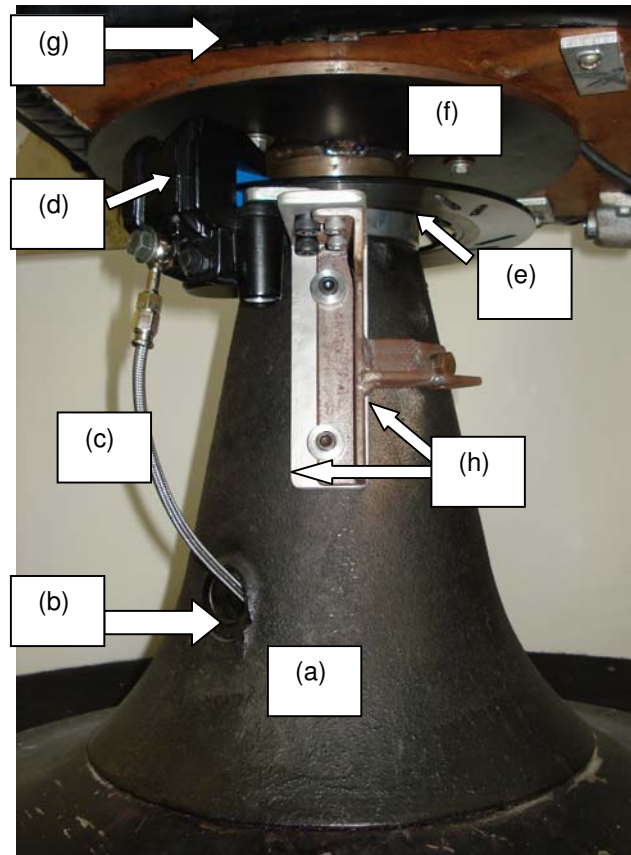


Figura 3: Freio hidráulico: cone de sustentação (a); orifício lateral (b); mangueira de fluido hidráulico (c); conjunto de pinça e pastilha (d); disco de freio (e); disco metálico da base do assento (f); base do assento (g); peças em “L” e em “T”. Fonte: Autor (2007). / *Hydraulic brake*.

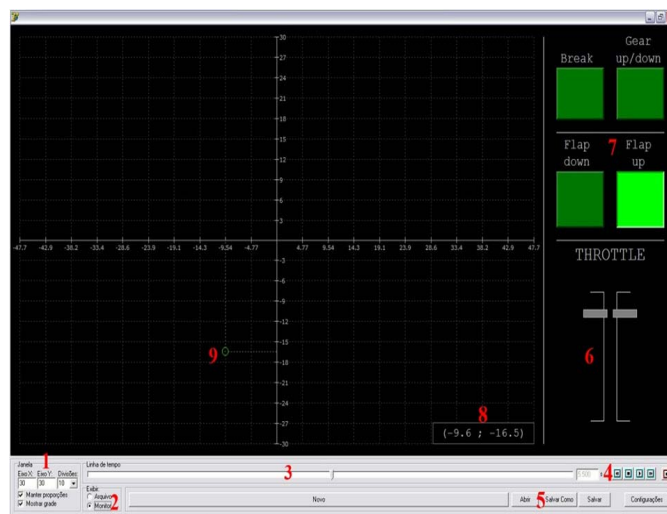


Figura 4: Flight Capture (Imagem: print screen da tela). Fonte: Autor (2007). / *Flight Capture*.



Figura 5: CREC-Ap sem a cobertura. No primeiro plano se identifica: monitor LCD da cadeira com microcâmara (a); manche (b); encosto da cadeira (c); apoio para a cabeça (d); apoio para as pernas (e); apoio para os pés (f). No segundo plano: monitor de televisão (g); monitor LCD do computador da unidade de controle da cadeira (h). Distingue-se, ao redor da CREC-Ap, um biombo forrado com tecido na cor verde (i) apropriado para prover absorção de ruído, tendo sido utilizado de forma a criar um ambiente separado, dentro do laboratório do Centro de Microgravidade da PUCRS, delimitando a área de experimentação. Fonte: Autor (2008). / *I-ECRC without cover*.

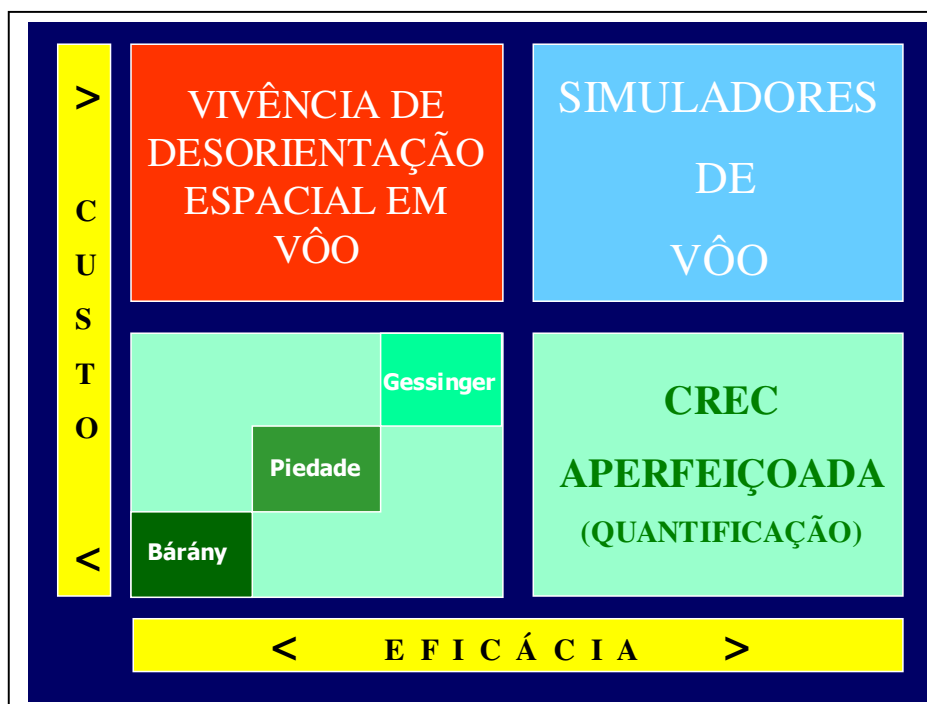


Figura 6: Aplicação da CREC-Ap: instrumento de quantificação da desorientação espacial, considerando-se o custo e a eficácia, em comparação a outros métodos e sistemas. A vivência de desorientação espacial em vôo traduz o alto custo associado à baixa eficácia na prevenção do fenômeno, pois não é possível reproduzi-lo de forma seqüencial e com avaliação de desempenho. A experimentação em simuladores de vôo, por sua vez, permite que se estabeleçam diversos perfis de vôo e se possa demonstrar a desorientação espacial, porém, com um custo elevado, o que restringe o seu uso para esta finalidade. Houve expressivo ganho, a partir da cadeira de Bárány, com o desenvolvimento da CREC proposta por Piedade (2001), que foi modificada por Gessinger (2005). Desta forma, concretizou-se a proposta de se poder contar com um instrumento eficaz e de baixo custo, a partir da CREC-Ap. Fonte: Autor (2008). / *I-ECRC Application*.