

Aperfeiçoamento de um simulador de desorientação espacial baseado no conceito de Bárány

Improvement of a spatial disorientation simulator based on the concept of Bárány

Perfeccionamiento de un simulador de desorientación espacial basado en el concepto de Bárány

Thais Russomano, PhD
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
trussomano@hotmail.com

Luiz Alberto Piedade, Doutor
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
piedade9@terra.com.br

Paulo Antônio Guimarães Lanzini Lopes
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
pagllopes@brturbo.com.br

Ingrid Gradaschi Lamadrid
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
ingridlamadrid@gmail.com

Leandro Disiuta, Mestre
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
ldisiuta@gmail.com

Ricardo Bertoglio Cardoso, Mestre
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
ricardo.cardoso@puhrs.br

Júlio César Marques de Lima, Mestre
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
jclima@puhrs.br

Cel Med Cloer Vescia Alves, Mestre
Centro de Microgravidade - PUCRS
Porto Alegre/RS - Brasil
cloer@terra.com.br

Recebido / Received / Recibido
14/02/14

Aceito / Accepted / Aceptado
06/03/14

RESUMO

A desorientação espacial é uma condição na qual um piloto não pode determinar, acuradamente, a localização da aeronave em relação ao ambiente aéreo e à superfície terrestre, colocando em risco a segurança do voo. Todas as pessoas são suscetíveis a ela, especialmente quando voam à noite ou em condições meteorológicas adversas. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo o aperfeiçoamento de um Simulador de Desorientação Espacial (SDE), com base no conceito de Bárány, para o treinamento de pilotos e realização de pesquisas em fisiologia aeroespacial. Para tanto, foi realizado um levantamento das limitações apresentadas pelo *hardware* e *software* de controle e pela estrutura mecânica do SDE existente no Centro de Microgravidade da PUCRS. Após essa etapa, foram definidas quais melhorias seriam contempladas. O SDE resultante deste estudo permitiu a frenagem magnética, inversão de direção de movimento e controle fino de velocidade e aceleração, características presentes apenas nessa versão do simulador, o que possibilitou ao mesmo atender às necessidades estabelecidas por protocolos de estudos em fisiologia aeroespacial. Este trabalho representa mais de uma década de experiência na realização de pesquisas em desorientação espacial, tendo seus resultados obtido reconhecimento internacional. Os dados apresentados demonstraram o impacto positivo dos aperfeiçoamentos alcançados na realização de pesquisas clínico-fisiológicas.

Palavras-chave: Simulador. Desorientação espacial. Conceito de Bárány. Acidente aéreo.

ABSTRACT

Spatial disorientation is a condition in which a pilot is unable to accurately determine the aircraft position relative to the airspace surrounding it or to the ground surface, putting at risk the flight safety. All individuals are susceptible to this experience, especially when flying at night or in adverse weather conditions. Therefore, this project aimed to make improvements to a Spatial Disorientation Simulator (SDS) based on the concept of Bárány, to facilitate pilot training and enable aerospace physiology research to take place. To this end, a survey was conducted on the limitations presented by the control software and hardware, and on the mechanical structure of the existing MicroG Centre simulator, from which were identified those features requiring improvement. The resultant SDS is equipped with magnetic braking, direction reversal and fine control of speed and acceleration, features found only in this version of the simulator, which enabled it to meet the needs established by aerospace physiology study protocols. This work results from more than a decade of experience conducting research in spatial disorientation, for which international recognition has been achieved. The data presented demonstrated the positive impact of the improvements achieved in conducting clinical-physiological research.

Keywords: Simulator. Spatial disorientation. Concept of Bárány. Air accident.

RESUMEN

La desorientación espacial es una condición en la cual un piloto no puede determinar, con precisión, la localización de la aeronave en relación al ambiente aéreo y a la superficie terrestre, colocando en riesgo la seguridad del vuelo. Todas las personas son susceptibles a ella, especialmente cuando vuelan de noche o en condiciones meteorológicas adversas. De esa forma, este trabajo tuvo como objetivo el perfeccionamiento de un Simulador de Desorientación Espacial (SDE), con base en el concepto de Bárány, para el entrenamiento de pilotos y realización de investigaciones en fisiología aeroespacial. Para eso, se realizó un relevamiento de las limitaciones presentadas por el hardware y software de control y por la estructura mecánica del SDE existente en el Centro de Microgravedad de la PUCRS. Después de esa etapa, fueron definidas cuales mejoras serian contempladas. El SDE resultante de este estudio permitió el frenado magnético, inversión de dirección de movimiento y control fino de velocidad y aceleración, características presentes solamente en esta versión del simulador, lo que posibilitó al mismo atender las necesidades establecidas por protocolos de estudios en fisiología aeroespacial. Este trabajo representa más de una década de experiencia en la realización de investigaciones en desorientación espacial, obteniendo resultados con reconocimiento internacional. Los datos presentados demostraron el impacto positivo de los perfeccionamientos alcanzados en la realización de investigaciones clínico-fisiológicas.

Palabras-clave: Simulador. Desorientación espacial. Concepto de Bárány. Accidente aéreo.

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de adaptação da fisiologia humana a outros ambientes, que não o terrestre, não é ilimitada. Em um voo, por exemplo, os referenciais para o equilíbrio e a orientação são diferentes dos utilizados em terra, o que ocasiona um conflito de informações e provoca a diminuição ou a perda da capacidade de orientação espacial (BENSON, 1998).

Na publicação inglesa *Medical Problems of Flying* (FLACK, 1920), já havia uma preocupação no estudo do equilíbrio e da orientação corporal no meio aeronáutico. A aviação mundial refere que cerca de 10% dos acidentes aéreos tem como causa a desorientação espacial, sendo que desses aproximadamente 90% são fatais (CLARK, 1971, 1955, 1953; KIRKHAM, 1978; TREDICI, 1980). Frente à impossibilidade de haver uma adaptação fisiológica à desorientação em voos, otimiza-se a prevenção desse fenômeno, com o intuito de minimizar a participação da desorientação espacial na gênese de acidentes aéreos (PARKER, 1980; RUSSOMANO, 2012).

A desorientação espacial ou “vertigem de piloto” é uma condição na qual um piloto não pode determinar, acuradamente, a localização da aeronave em relação ao ambiente aéreo e à superfície terrestre. Todos os pilotos são suscetíveis a ela, especialmente quando voam à noite ou em condições meteorológicas adversas.

De acordo com Benson (1974, 1975), a desorientação espacial tem sido um fenômeno constante na rotina dos pilotos. Aulas práticas ministradas nos cursos de aviação tentam demonstrar os efeitos de diferentes tipos de desorientação espacial passíveis de ocorrer em voos. Para isso, são usados simuladores, com base no conceito de Bárány, em que a desorientação espacial ocorre por meio da utilização de um conjunto de estimulação angular do sistema vestibular em seus três planos.

Em geral, esse dispositivo consiste em uma cadeira montada em uma plataforma com um eixo rotatório, que permite girá-la de forma controlada. Entretanto, uma limitação importante é o fato de as cadeiras serem comumente acionadas de forma manual, resultando, assim, em uma oscilação indesejada da aceleração angular, o que pode auxiliar na orientação espacial do piloto, invalidando o teste.

2 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo o aperfeiçoamento dos sistemas de controle e mecânico

de um Simulador de Desorientação Espacial (SDE), com base no conceito de Bárány, desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia Aeroespacial do Centro de Microgravidade da PUCRS, para o treinamento de pilotos e o uso na realização de pesquisas em fisiologia aeroespacial.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura aborda os aspectos mais relevantes relativos aos diferentes tipos de desorientação e ilusões espaciais ligadas ao sistema vestibular, bem como a técnica desenvolvida por Robert Bárány para sua demonstração e seu estudo.

3.1 Desorientação espacial em voo

Os acidentes aeronáuticos são muitas vezes ocasionados pela desorientação espacial durante o voo. Há três tipos básicos de desorientação espacial que podem ser sofridos por pilotos:

Tipo I (não reconhecido): o piloto não sabe que está desorientado ou que perdeu a consciência situacional, sendo isso muito perigoso, pois o mesmo continua pilotando a aeronave normalmente e nada fará para corrigir o problema. Em suma, isso significa que o piloto comanda a aeronave de acordo com uma errônea percepção em relação à orientação. É dito que o piloto “morre com um sorriso na face”.

O Tipo II (reconhecida) é mais comum do que o Tipo I. Nela, o piloto tem conhecimento de que existe um problema e que o seu sistema sensorial está dando informações que não estão de acordo com as disponíveis pelos instrumentos de voo. Se o piloto conseguir manejar esse conflito, o acidente ou incidente aéreo poderá ser evitado. Desse modo, a capacitação dos pilotos em relação a essas situações tem se mostrado uma ferramenta importante, pois, reconhecendo que a desorientação espacial está acontecendo, o piloto pode tomar atitudes corretas, a partir da leitura dos instrumentos da aeronave.

No Tipo III (incapacitante), o piloto é exposto à forma mais estressante de desorientação, pois, apesar de estar ciente da desorientação, essa é muito intensa, impossibilitando qualquer reação.

A Tabela 1 mostra o número de experiências relatadas em um estudo realizado por Clark (1971) sobre desorientações espaciais sofridas por pilotos.

Tabela 1: Experiências em voos relativas à desorientação espacial, baseadas em questionários realizados com 137 pilotos (1956) e 321 pilotos (1970).

Pilotos que reportaram incidentes em (%)	1956	1970
Sensação que uma das asas está mais baixa enquanto as asas estão niveladas.	60	67
No nivelamento após curva inclinada tende a inclinar na direção oposta.	45	67
Sente que está nivelado quando está fazendo uma curva.	39	66
Confusão de informações entre instrumentos e informação visual.	34	31
Ao recobrar de uma curva acentuada, sente o giro em direção oposta.	29	55
Sentimento de isolamento e separação da terra quando em alta altitude (<i>break-off</i>).	23	33
Em noite escura, ponto iluminado abaixo parece estar se movendo erratically.	21	23
Falha na checagem do altímetro e chega muito perto do solo.	12	12

Fonte: adaptado de Clark (1971).

A Tabela 2 resume, por meio da análise de questionários, a experiência de desorientações espaciais sofridas por 104 pilotos da Marinha Norte-Americana (USN) (TORMES, 1974), 182 pilotos da Força Aérea Real Britânica (RN1) (STEELE-PERKINS, 1978) e 300 pilotos da Marinha Real Britânica (RN2) (TORMES, 1974).

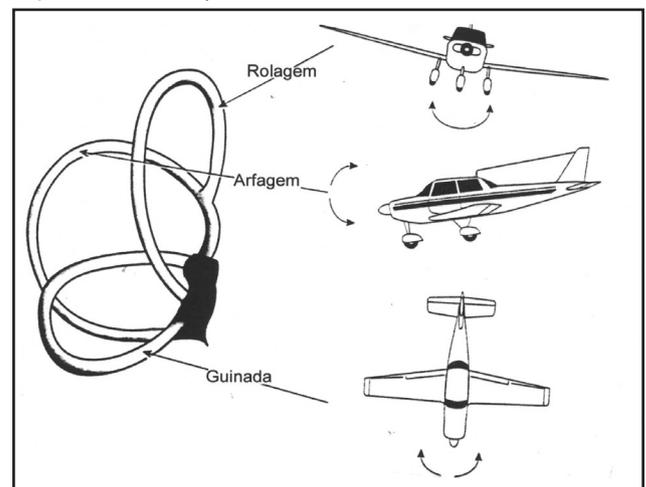
Tabela 2: Percentagem de pilotos que tiveram experiência de desorientação, baseado na análise de questionários.

Classificação	SN	RN1	RN2
Sensação de que não está nivelado após fazer uma curva.	91	96	94
Erro na posição relativa ou movimento da nave em aproximação noturna.	58	73	74
Erro na interpretação do horizonte verdadeiro em manobra dentro de nuvem.	47	46	45
Erro de interpretação da altitude logo após a decolagem da nave.	21	34	38
Erro de interpretação do horizonte verdadeiro por observar luzes em terra.	33	28	15
Sensação de estar suspenso no espaço.	*	19	16
Sensação de instabilidade (equilibrando-se no fio de uma faca).	*	*	18

Fonte: adaptado de Tormes (1974) e Steele-Perkins (1978).

As desorientações espaciais podem ocorrer devido à ilusão por aceleração linear ou ilusão por aceleração rotacional, foco desse estudo. A porção do aparelho vestibular responsável pela percepção do equilíbrio rotacional são os canais semicirculares, da orelha interna, situados próximos ao utrículo e ao sáculo. Os canais semicirculares são divididos em: anterior, posterior e horizontal, sendo dispostos em ângulos retos entre si, representando os três planos cartesianos do espaço. Cada canal semicircular tem uma dilatação em uma de suas extremidades, chamada de ampola, onde localiza-se o seu transdutor mecânico/elétrico, a crista ampular. Cada crista ampular contém células ciliares, e na sua porção superior, há uma massa gelatinosa chamada cúpula, recoberta com células pilosas. Banhando a crista ampular, existe a endolinfa (líquido que preenche os canais semicirculares, na sua porção membranosa). O fluxo da endolinfa na ampola, gerado pela inclinação da cabeça, estimula as células ciliadas, indicando a direção do movimento. A ilusão por aceleração rotacional, como pode ser vista na Figura 1, mostra a relação dos canais semicirculares do sistema vestibular humano com os três planos espaciais cartesianos e os movimentos da aeronave.

Figura 1: Planos espaciais.

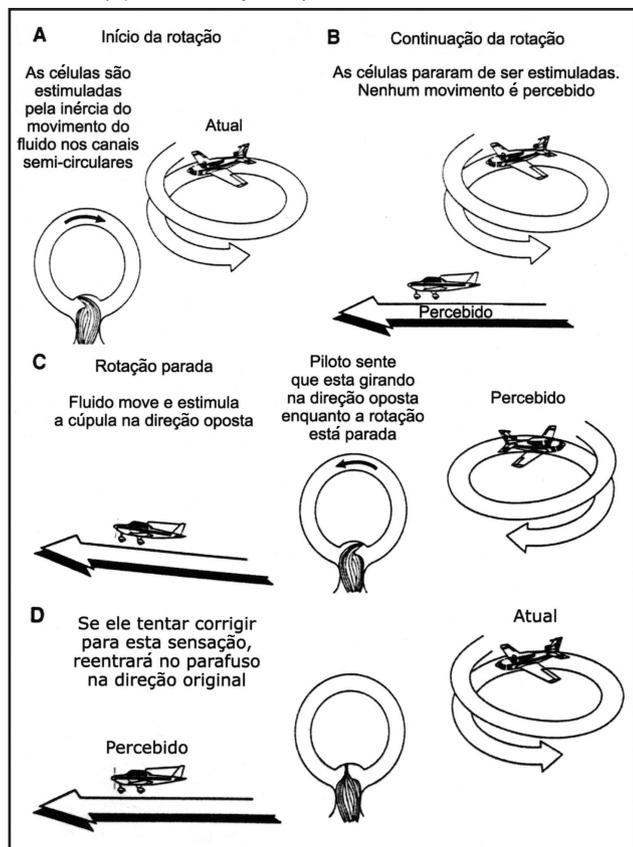


Fonte: Piedade (2001).

Uma ilusão comum do sistema vestibular (*Graveyard Spin*), associada à aceleração rotacional, ocorre quando o piloto faz um parafuso em uma direção de giro e os canais semicirculares identificam a direção do parafuso, fazendo com que o piloto perceba a rotação. Após alguns segundos, caso não haja variação na magnitude da aceleração, a

sensação de rotação vai diminuindo até desaparecer, dando a impressão de que a aeronave não está mais em curva. Quando o piloto sai da manobra, por inércia, a endolinfa, que continua a girar fletindo a crista ampular (transdutor), dá a falsa impressão de que o indivíduo está girando em direção oposta (sensação de que o piloto corrigiu demais o giro). Nesse momento, o piloto volta a girar na direção original, sem sair do parafuso, ocasionando o acidente. Na Figura 2A, a cúpula, estrutura dos canais semicirculares responsável por identificar o movimento rotacional, é estimulada pela inércia da endolinfa e, na Figura 2B, a aceleração angular é nula e o movimento não é percebido. Ao nivelar o avião, o piloto percebe, pela inércia da endolinfa, um sentido de giro oposto ao da manobra, e a sensação é de que o giro foi feito erroneamente (Figura 2C). O piloto então corrige a falsa percepção, entrando novamente em parafuso, na direção original (Figura 2D).

Figura 2: (A) Início da manobra, (B) continuação, (C) nivelamento do avião, (D) desorientação espacial.



Fonte: Piedade (2001).

A desorientação espacial, no entanto, não se restringe à interação ambiente, homem e avião.

Helicópteros também são alvo de estudos, pois podem ocasionar os mesmos tipos de desorientação espacial (STEELE-PERKINS, 1978; TORMES, 1974).

3.2 Simulador de desorientação espacial – conceito de Bárány

O SDE é um dispositivo utilizado para realização de testes de desorientação espacial, particularmente para pilotos e estudantes de faculdades de ciências aeronáuticas.

Ko (2003) mostra o desenvolvimento do modelo e sistema de controle para SDEs descentralizados, onde o reflexo vestibulo-ocular é mensurado por meio de câmeras (Figura 3).

Figura 3: Cadeira rotatória com plano inclinado.



Fonte: Ko (2003).

Diferentes SDEs já estão disponibilizados no mercado por empresas especializadas. Enticott (2005) e Byun (2010) demonstram a utilização do dispositivo Micromedical Technologies System 2000 Rotational Chair, onde são explorados diferentes protocolos de rotação para estímulo da desorientação (Figura 4).

Figura 4: Dispositivo da Micromedical Technologies System 2000.



Fonte: Byun (2010).

O Epley Omniax, desenvolvido pela empresa Vesticon, possibilita, além da rotação, a inclinação do paciente de 0° a 360° (Figura 5).

Figura 5: Sistema Epley Omniax® da empresa Vesticon.



Fonte: Vesticon (2014).

Complementarmente ao estímulo e mensuração da desorientação pelo movimento ocular, alguns equipamentos já possibilitam a avaliação do indivíduo

em situações simuladas, como o voo. O GAT-II da Environmental Tectonics emprega um simulador de voo e uma versão estilizada de uma cabine de aeronave para criar um ambiente mais próximo ao voo real (Figura 6).

Figura 6: Sistema de treinamento GAT-II desenvolvido pela empresa Environmental Tectonics Corporation.



Fonte: Embry-Riddle (2014).

Na PUCRS, com base na necessidade do treinamento prático dos alunos em fisiologia aeroespacial e de se realizar a simulação das condições enfrentadas por astronautas, o Centro de Microgravidade da Faculdade de Engenharia (FENG) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), por meio de seu Laboratório de Engenharia Aeroespacial, desenvolveu, em 2001, seu primeiro protótipo do SDE (PIEDADE, 2001), sendo esse posteriormente aperfeiçoado por Gessinger (2005), Alves (2008) e pelo presente estudo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com intuito de definir o aperfeiçoamento necessário ao sistema de desorientação, foi realizado um levantamento das limitações apresentadas pelo *hardware* e *software* de controle e pela estrutura mecânica do SDE. Com a conclusão dessa etapa, foram definidas quais melhorias que seriam contempladas.

Assim, por meio da revisão dos estudos realizados no Centro de Microgravidade por Piedade (2001), Gessinger (2005), Russomano (2005) e Alves (2008) comparou-se as principais limitações apontadas nos protocolos desenvolvidos e nos resultados obtidos quanto à desorientação dos voluntários. De forma a enriquecer os dados encontrados, discussões multidisciplinares foram organizadas com integrantes do Laboratório de Fisiologia Aeroespacial, do grupo de engenharia biomédica do Laboratório de Engenharia Aeroespacial e da Coordenação de Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação do Centro de Microgravidade.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse estudo para o aperfeiçoamento do Simulador de Desorientação Espacial serão apresentados e descritos a seguir.

4.1.1 Sistema de desorientação espacial

A primeira versão do SDE (Figura 7A) do Centro de Microgravidade da PUCRS foi idealizada por Piedade (2001) e possuía um conjunto motor externo, adaptado no eixo da cadeira, composto de coroa, pinhão e corrente. Internamente, no eixo central da estrutura, foi adaptado um par de rolamentos de encosto, com o intuito de diminuir o atrito do eixo do motor. Para fixação do assento, foi soldada uma chapa no topo do eixo central, no qual o mesmo foi aparafusado. De forma a minimizar o desbalanceamento da cadeira e possibilitar uma maior segurança do voluntário durante o giro, foram introduzidos um apoio para a cabeça, um suporte para os pés e um cinto de dois pontos. O sistema de transmissão de força consistia em um motor elétrico de corrente contínua de 24 V, com rotação nominal de 3000 rpm e fator de redução de 15:1. A transmissão de movimento entre o motor e o eixo foi possibilitada por meio de duas polias de canal trapezoidal, com uma correia de perfil trapezoidal “A29”, gerando uma relação de 5:1 entre a polia motora e a movida e uma rotação final máxima do sistema de 40 rpm. O controle do motor foi realizado por um circuito PWM (*Pulse-Width Modulation*), em uma frequência de 10 kHz e com capacidade de disponibilizar até 10 A de corrente. Esse era

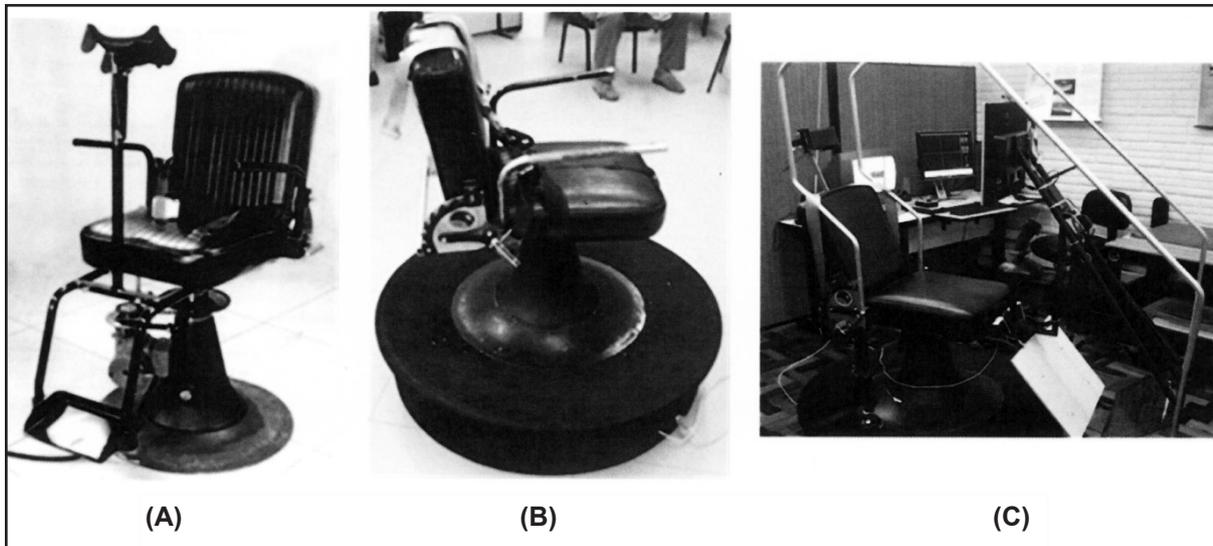
alimentado por uma fonte de tensão com entrada de 220 V_{CA} e uma saída ajustável de 24 V_{CC}.

O sistema era instrumentado com um tacômetro, composto de um gerador de tensão microprocessado por um controlador 89C2051, o qual disponibilizava a informação do número de voltas por meio da variação de um nível de tensão elétrica.

A segunda versão (Figura 7B), aperfeiçoada por Gessinger (2005), introduziu uma plataforma circular de madeira, com revestimento acústico interno, utilizada como sustentação para a cadeira. O conjunto motor foi movido para dentro da plataforma, reduzindo consideravelmente os ruídos da transmissão e dando maior estabilidade à cadeira. Essa redução permitiu evitar que o voluntário obtivesse um ponto sonoro de orientação espacial. Nas laterais do assento, foi adaptada uma trava dentada de segurança, em aço 1020, escalonada em intervalos de 15°, a qual possibilitou a angulação do encosto da cadeira entre 0 e 90 graus. Outro recurso adicionado foi um apoio para pernas e pés, que, junto com a inclinação do encosto, permitiu utilizar a posição supina durante os experimentos. Um cinto de cinco pontos foi incluído na estrutura, em substituição ao anterior, assegurando uma maior estabilidade ao voluntário, independentemente do ângulo de reclino utilizado na cadeira.

A terceira versão (Figura 7C), desenvolvida por Alves (2008), promoveu uma modernização da instrumentação da cadeira, possibilitando uma avaliação mais abrangente das respostas fisiológicas do voluntário, bem como sua performance, nas diversas situações previstas em voo.

Figura 7: (A) SDE por Piedade (2001), (B) SDE por Gessinger (2005), (C) SDE por Alves (2008).



Fonte: Alves (2008).

Com o intuito de criar um ambiente de *cockpit* na cadeira, foi desenvolvida uma estrutura utilizando tubos de alumínio para suporte de uma cobertura em curvim emborrachado (*blackout*), na cor bege, minimizando fatores de influência do meio externo (som, ar e, principalmente, luminosidade). Nessa estrutura, foram fixados um monitor LCD de 19 polegadas e um *joystick*, com interface USB, permitindo ao voluntário, por meio do *software Flight Simulator X* da *Microsoft*®, controlar o manche de uma aeronave virtual em diferentes cenários simulados de voo. Foi instalada uma câmera com luz infravermelha para capturar imagens do voluntário durante os experimentos, com o objetivo de avaliar as reações do mesmo. Para transmissão de dados USB, foi utilizado um aparelho WUSB (*Wireless USB*) que é uma versão sem fios de um HUB com portas USB, já para a transmissão de energia para os equipamentos utilizados como monitor, HUB USB sem fio e a unidade de dois contatos para até 4 A.

Para a realização dos aperfeiçoamentos identificados como necessários para um melhor funcionamento do SDE do Centro de Microgravidade-PUCRS, foi realizada a aquisição de dois materiais: um moto-redutor e um inversor de frequência.

Foi escolhido um Moto-redutor angular *Spiroplan*® (*SEW Eurodrive - WF10 DT56M4*), com alimentação de 380V (trifásico) e potência de 0,1

kW, a qual permite uma rotação de até 1640 rpm a 60 Hz, uma redução de 8:1.

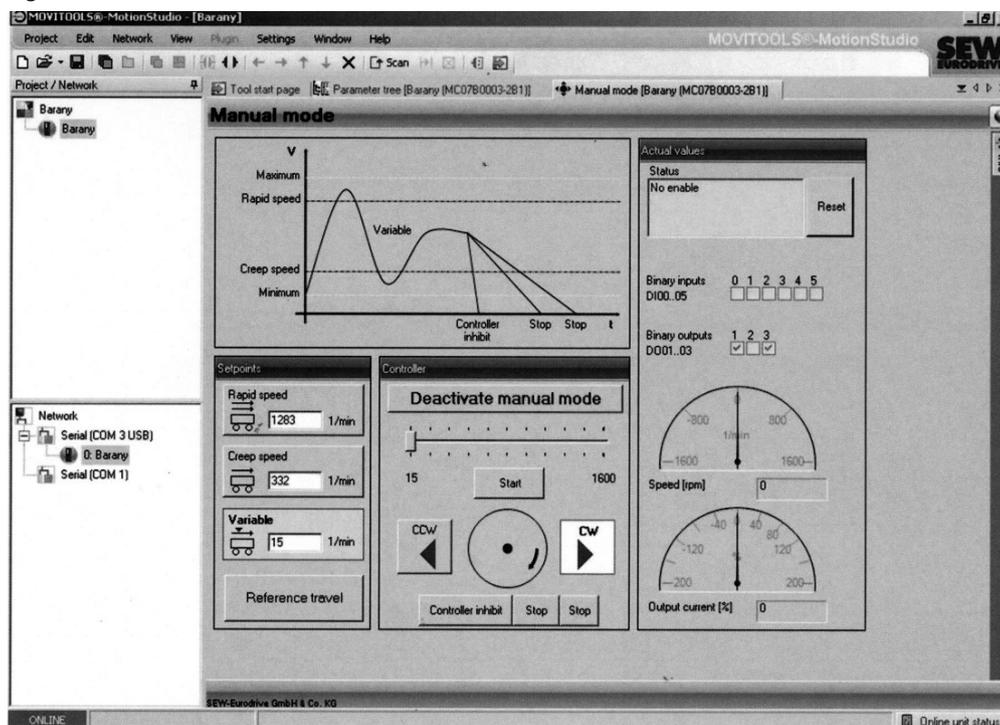
Para o controle de acionamento, aceleração e velocidade de rotação do motor, foi utilizado um inversor de frequência *MOVTRAC*® (*SEW Eurodrive MC07B0003-2B1-4-00*), com potência de 250 W, conexão de rede trifásica de 380 V_{CA}.

O sistema possui um controle manual (*SEW Eurodrive FBG11B*) que permite a programação das condições de rotação do moto-redutor (rotação máxima desejada, tipo de motor e rampas de aceleração e desaceleração). Além do controle manual, o inversor também possui interface RS485/Sbus - FSC11B para computador, que possibilita o controle do mesmo pelo aplicativo *Movitools MotionStudio v. 5.70* da *SEW Eurodrive* conforme Figura 8. Através dele, podem ser configurados remotamente todos os parâmetros disponíveis no inversor.

4.2 Métodos

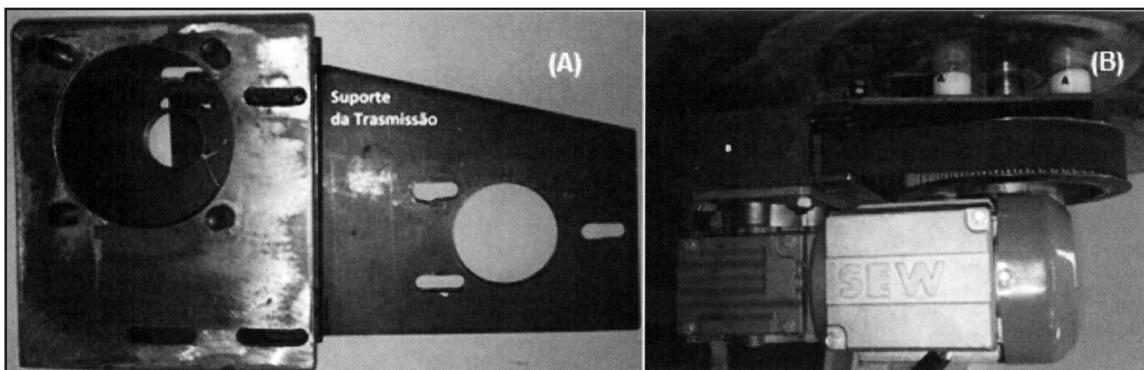
Foram realizadas, em relação ao projeto desenvolvido por Alves (2008), três modificações principais no projeto do SDE: atualização do sistema de controle, confecção de um novo suporte para o motor e a reforma do sistema mecânico de sustentação e giro da cadeira. O limite de massa dos voluntários foi estabelecido em 90 kg.

Figura 8: Interface do *software Movitools MotionStudio v. 5.70* da *Sew-Eurodrive*.



Fonte: O autor.

Figura 9: Suporte de fixação para o motor elétrico. (A) suporte de fixação, (B) conjunto de transmissão.



Fonte: O autor.

4.2.1 Atualização do sistema de controle

Foram removidos do sistema existente o motor de corrente contínua e o sistema de controle por modulação de largura de pulso (PWM), sendo esses substituídos pelo moto-redutor instrumentado e pelo inversor de frequência digital adquiridos. Dessa forma, o controle de parâmetros, como velocidade de rotação, rampas de aceleração e desaceleração e limites de potência entregues ao motor passaram a ser configurados por meio do aplicativo para *Windows MotionStudio v. 5.70*.

4.2.2 Confeção do suporte para o motor

Para fixar o novo motor, foi necessária a confecção de um suporte. A peça foi desenhada com auxílio do *software Solidworks®* e, então, foi construído um *mock-up* em madeira MDF para realização dos ajustes necessários. O suporte, em sua versão final, foi confeccionado em aço carbono 1020, com espessura de 6,35 mm, e soldado com eletrodo revestido 6013. Após a finalização dessa etapa, o suporte foi fixado juntamente com o moto-redutor e a transmissão entre o motor e o eixo da cadeira. Duas polias de canal trapezoidal e de correia de perfil trapezoidal modelo “A29”, presentes no projeto anterior, foram utilizadas, produzindo uma relação de 5:1 entre o motor e o eixo. Na Figura 9A pode ser visualizado o suporte de fixação e na Figura 9B o conjunto de transmissão montado.

4.2.3 Reforma do sistema mecânico

Foi necessário reformar a estrutura mecânica de forma a solucionar problemas de folga, principalmente axial e radial nos mancais de escorregamento e rolamento. Essa folga gerava vibrações durante o giro, possibilitando a percepção do movimento pelo voluntário durante experimentos.

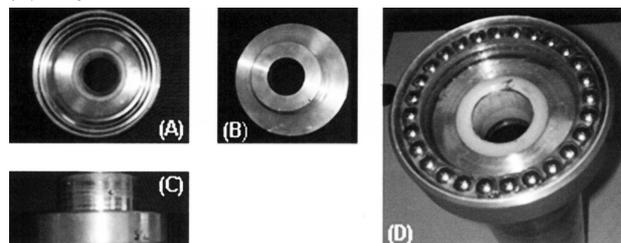
Assim, foram realizadas as seguintes modificações: 1) a fixação do eixo na cadeira; 2) a remanufatura do eixo e; 3) a reforma dos mancais de rolamento e escorregamento.

Na base de sustentação do assento da cadeira, foi aparafusado um disco em aço SAE 1020. Nesse disco, foi fixado um bloco circular em aço e esse, por sua vez, foi soldado eletricamente ao eixo da cadeira, possibilitando, assim, uma maior estabilidade durante o movimento.

O novo eixo foi confeccionado em aço SAE 1020 em um torno mecânico, com 900 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro externo, possuindo uma furação interna passante. Essa furação, além de diminuir o peso, aumentou a resistência à solicitação de flexão.

A estrutura apresentava mancais do tipo misto (rolamento e escorregamento), sendo o rolamento axial de esferas de escora simples. No centro da peça, havia uma bucha de nylon, a qual funcionava como mancal de escorregamento e, ao mesmo tempo, de guia para o eixo. As modificações realizadas se concentraram no mancal (Figura 10), que teve seu posicionamento invertido, diminuindo a interferência mecânica e, assim, melhorando a performance do giro do eixo. A bucha em nylon teve o seu diâmetro aumentado, por intermédio de um alargador, de forma a se ajustar ao diâmetro do novo eixo.

Figura 10: Vistas do mancal. (A) superior; (B) inferior; (C) lateral; (D) conjunto montado.



Fonte: O autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparativamente com o SDE desenvolvido por esse projeto, as soluções apresentadas por Ko (2003) e Byun (2010) não permitem a movimentação do indivíduo para realização de oscilações de cabeça, utilizadas por diferentes protocolos de pesquisa. Ainda, as soluções demonstradas por Vesticon (2014) e Embry-Riddle (2014), apesar de possuírem maior número de recursos, exigem um amplo espaço físico e maior infraestrutura e treinamento para sua operação.

O SDE do Centro de Microgravidade, desde a sua primeira concepção em 2001, sofreu evoluções alinhadas às necessidades de pesquisas propostas no campo da desorientação espacial e do treinamento de estudantes e pilotos no entendimento dos seus efeitos no ser humano.

Entre as pesquisas realizadas, a avaliação de medicamentos no combate aos sintomas da cinetose aeroespacial realizado por Russomano (2005) e a respectiva análise da performance cognitiva decorrente dessa associação, investigado por Subasinghe (2013), possibilitaram um melhor entendimento desses efeitos. A aplicação de incrementos tecnológicos e eletrônicos também oportunizou a busca da quantificação da desorientação espacial.

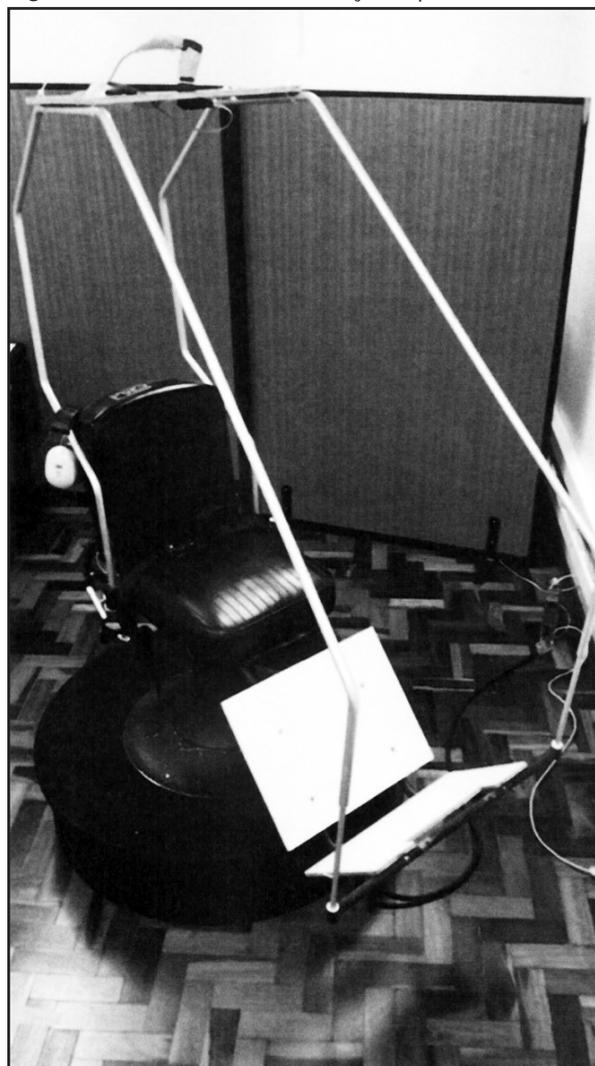
O SDE apresentado no presente artigo (Figura 11) possibilita o estabelecimento de um protocolo de testes fisiológicos mais preciso, pois permite o controle das rampas de aceleração e desaceleração (controle proporcional e integral) do movimento rotatório. Em comparação com o sistema baseado em PWM e motor de corrente contínua utilizado por Alves (2008), o inversor de frequência e motor de corrente alternada do presente sistema permitiram a troca do sentido de giro e um torque mais constante no eixo.

O *software Movitools MotionStudio v. 5.70 da Sew-Eurodrive*, fabricante desse motor e inversor, possibilitou o acesso a uma interface de controle mais completa, porém acessível, em que o usuário pode modificar as variáveis de configuração de forma rápida e amigável. Na versão anterior, uma interface composta por um potenciômetro e dois *displays* de sete segmentos permitia apenas definir a rotação por minuto desejada e verificar a rotação atual.

A remanufatura do eixo da cadeira e de seus mancais trouxe uma maior estabilidade do movimento, tornando o SDE mais fluido e silencioso e, assim, facilitando a desorientação do voluntário, que passou a ter menos referências externas quando comparado com as versões anteriores.

O SDE desenvolvido foi utilizado com sucesso para a realização de um estudo com seres humanos, o qual avaliou a variação da performance cognitiva dos voluntários quando expostos à desorientação por rotação, em uma pesquisa em cooperação com o grupo do *Centre of Human Aerospace and Physiological Sciences (CHAPS)*, *King's College London*, do Reino Unido.

Figura 11: Simulador de Desorientação Espacial atual.



Fonte: O autor.

6 CONCLUSÃO

Simuladores de desorientação espacial são uma ferramenta valiosa no estudo da resposta fisiológica humana ao conflito de informações recebidas pelos sistemas vestibular, visual, auditivo e tátil durante voos aéreos, especialmente à noite ou em situações de baixa luminosidade.

O SDE desenvolvido pelo Centro de Microgravidade e apresentado nesse trabalho é o resultado de mais de uma década de experiência na realização de pesquisas internacionalmente reconhecidas sobre desorientação espacial.

A frenagem magnética, a inversão de direção de movimento e o controle fino de velocidade e aceleração, características presentes apenas nessa versão do simulador, possibilitaram ao SDE atender às necessidades estabelecidas por protocolos de pesquisas clínico-fisiológicas.

Para projetos futuros, sugere-se a inclusão de um sistema de realidade virtual para ampliar as aplicações do SDE e o fechamento da malha de controle por meio da inclusão de *encoders* de posição absoluta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, C. V. **Desenvolvimento de um sistema para quantificação da desorientação espacial**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 223p.
- BENSON, A. J. **Orientation/disorientation training of flying personnel: a working group report**. ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE), 1974.
- BENSON, A. J.; DIAZ, E.; FARRUGIA, P. The perception of body orientation relative to a rotating linear acceleration vector. **Fortschritte der Zoologie**, v. 23, n. 1, p. 264, 1975.
- BENSON, A. J., **Human control performance and tolerance, with a preliminary historical review of flight simulation**, CC Clark - National Meeting on Manned Space Flight, 1998.
- BYUN, J. Y. et al. Role of subjective visual vertical test during eccentric rotation in the recovery phase of vestibular neuritis. **Auris Nasus Larynx**, v. 37, n. 5, p. 565-569, 2010.
- CLARK, B. Disorientation incidents reported by military pilots across fourteen years of flight. In: **The Disorientation Incident. Conference Report CP**. 1971. p. A1.
- CLARK, B.; GRAYBIEL, A. Disorientation: A cause of pilot error. **Bureau of Medicine and Surgery Research Report No. NM**, v. 1, n. 110, p. 100, 1955.
- CLARK, B.; NICHOLSON, M. A.; GRAYBIEL, A. Fascination: a cause of pilot error. **Journal of Aviation Medicine**, v. 24, n. 5, p. 429-440, 1953.
- ENTICOTT, J. C.; O'LEARY, S. J.; BRIGGS, R. J. S. Effects of vestibulo-ocular reflex exercises on vestibular compensation after vestibular schwannoma surgery. **Otology & Neurotology**, v. 26, n. 2, p. 265-269, 2005.
- EMBRY-RIDDLE. **GAT-II Spatial Disorientation Flight Training Device**. 2014. Disponível em: <<http://daytonabeach.erau.edu/about/fleet-simulators/the-gat-ii/index.html>>. Acesso em: 06 nov. 2014.
- FLACK, M.; BOWDLER, A. P. The medical problems of flying. **Medical Research Council**, Special Report Series, n. 53, 1920.
- 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.
- KIRKHAM, W. R. et al. Spatial disorientation in general aviation accidents. **Aviation, space, and environmental medicine**, 1978.
- KO, J.S. et al. Precision speed control of PMSM for stimulation of the vestibular system using rotatory chair. **Mechatronics**, v. 13, n. 5, p. 465-475, 2003.
- PARKER, D. E. The vestibular apparatus. **Scientific American**, 1980.
- PIEDEDE, L. A.; RUSSOMANO, T. **Cadeira de Bárány como modelo de desorientação espacial**. 2001. 101 f. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- RUSSOMANO, T. et al. Aperfeiçoamento e validação de simulador de desorientação espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, 2005. p. 97-103.
- RUSSOMANO, T. **Fisiologia aeroespacial: conhecimentos essenciais para voar com segurança**. EDIPUCRS, 2012.
- STEELE-PERKINS, A. P.; EVANS, D. A. Disorientation in naval helicopter pilots. In **Operational Helicopter Aviation Medicine. Conference Proceedings CP 255**, 48, 1-5. Neuilly sur Seine: AGARD/NATO, 1978.
- SUBASINGHE, T.; GREEN, D. A.; RUSSOMANO, T. **Impact of Spatial Disorientation on Concurrent Cognitive Tasks**. 2013. 47 f. 2013. Dissertação de Mestrado, School of Biomedical Science, King's College London, Londres, Reino Unido.
- TORMES, F. R.; GUEDRY, F. E. **Disorientation phenomena in naval helicopter pilots**. Pensacola, FL: **US Naval Aerospace Medical Research Laboratory**. Report, 1974.
- TREDICI, T. J. Visual illusions as a probable cause of aircraft accidents. **Spatial Disorientation in Flight: Current Problems**, 1980.
- VESTICON. **Epley Omniax® System**. 2014. Disponível em:< <http://www.vesticon.com/epley-omniax-system>>. Acesso em: 06 nov. 2014.