

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Recibido / Received / Recebido
14/02/14

Aceptado / Accepted / Aceito
06/03/14

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.

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.

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.

1 INTRODUCCIÓN

No se elimina la capacidad de adaptación de la fisiología humana a otros ambientes, que no sea el terrestre. En un vuelo, por ejemplo, las referencias para el equilibrio y la orientación son diferentes de los utilizados en tierra, lo que ocasiona un conflicto de informaciones y provoca la disminución o pérdida de la capacidad de orientación espacial (BENSON, 1998).

En la publicación inglesa *Medical Problems of Flying* (FLACK, 1920), ya había una preocupación por estudiar el equilibrio y la orientación corporal en el medio aeronáutico. La aviación mundial refiere que cerca de 10% de los accidentes aéreos tiene como causa la desorientación espacial, siendo que de esos, aproximadamente 90% son fatales (CLARK, 1971, 1955, 1953; KIRKHAM, 1978; TREDICI, 1980). Frente a la imposibilidad de haber una adaptación fisiológica a la desorientación en vuelos, se optimiza la prevención de ese fenómeno, con el objetivo de minimizar la participación de la desorientación espacial en la génesis de accidentes aéreos (PARKER, 1980; RUSSOMANO, 2012).

La desorientación espacial o “vértigo de piloto” 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. Todos los pilotos son susceptibles a ella, especialmente cuando vuelan de noche o en condiciones meteorológicas adversas.

De acuerdo con Benson (1974, 1975), la desorientación espacial ha sido un fenómeno constante en la rutina de los pilotos. Clases prácticas impartidas en los cursos de aviación intentan demostrar los efectos de diferentes tipos de desorientación espacial pasibles de ocurrir en vuelos. Para eso, son usados simuladores, con base en el concepto de Bárány, en que la desorientación espacial ocurre por medio de la utilización de un conjunto de estimulación angular del sistema vestibular en sus tres planos.

En general, ese dispositivo consiste en una silla montada en una plataforma con un eje rotatorio, que permite girarla de forma controlada. Sin embargo, una limitación importante es el hecho de que las sillas son comúnmente accionadas de forma manual, resultando, así, en una oscilación indeseada de la aceleración angular, lo que puede auxiliar en la orientación espacial del piloto, invalidando la prueba.

2 OBJETIVO

Este trabajo tuvo como objetivo el perfeccionamiento de los sistemas de control y mecánico de un Simulador de

Desorientación Espacial (SDE), con base en el concepto de Bárány, desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial del Centro de Microgravedad de la PUCRS, para el entrenamiento de pilotos y el uso en la realización de investigaciones en fisiología aeroespacial.

3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

La revisión de la literatura aborda los aspectos más relevantes relativos a los diferentes tipos de desorientación e ilusiones espaciales relacionadas al sistema vesicular, así como la técnica desarrollada por Robert Bárány para su demostración y su estudio.

3.1 Desorientación espacial en vuelo

Los accidentes aeronáuticos son muchas veces ocasionados por la desorientación espacial durante el vuelo. Hay tres tipos básicos de desorientación espacial que pueden sufrir los pilotos:

Tipo I (no reconocido): el piloto no sabe que está desorientado o que perdió la consciencia situacional, siendo eso muy peligroso, pues el mismo continúa pilotando la aeronave normalmente y nada hará para corregir el problema. En suma, eso significa que el piloto comanda la aeronave de acuerdo con una errónea percepción en relación a la orientación. Se dice que el piloto “muere con una sonrisa en la cara”.

El Tipo II (reconocida) es más común que el Tipo I. En ella, el piloto tiene conocimiento de que existe un problema y que su sistema sensorial está dando informaciones que no están de acuerdo con las disponibles por los instrumentos de vuelo. Si el piloto consigue manejar ese conflicto, podrá ser evitado el accidente o incidente aéreo. De ese modo, la capacitación de los pilotos en relación a esas situaciones se ha mostrado una herramienta importante, pues, reconociendo que la desorientación espacial está aconteciendo, el piloto puede tomar actitudes correctas, a partir de la lectura de los instrumentos de la aeronave.

En el Tipo III (incapacitante), el piloto es expuesto a la forma más estresante de desorientación, pues, a pesar de estar consciente de la desorientación, la misma es muy intensa, imposibilitando cualquier reacción.

La Tabla 1 muestra el número de experiencias relatadas en un estudio realizado por Clark (1971) sobre desorientaciones espaciales sufridas por pilotos.

Tabla 1: Experiencias en vuelos relativas a la desorientación espacial, basadas en cuestionarios realizados con 137 pilotos (1956) y 321 pilotos (1970).

Pilotos que reportaron incidentes en (%)	1956	1970
Sensación que una de las alas está más baja mientras las alas están niveladas.	60	67
No nivelamiento después de curva inclinada tiende a inclinar en la dirección opuesta.	45	67
Siente que está nivelado cuando está haciendo una curva.	39	66
Confusión de informaciones entre instrumentos e información visual.	34	31
Al recuperar de una curva acentuada, siente el giro en dirección opuesta.	29	55
Sentimiento de aislamiento y separación de la tierra en alta altitud (<i>break-off</i>).	23	33
En noche oscura, punto iluminado abajo parece estar moviéndose erráticamente.	21	23
Falla en la comprobación del altímetro y llega muy cerca del suelo.	12	12

Fuente: adaptado de Clark (1971).

La Tabla 2 resume, por medio del análisis de cuestionarios, la experiencia de desorientaciones espaciales sufridas por 104 pilotos de la Marina Norteamericana (USN) (TORMES, 1974), 182 pilotos de la Fuerza Aérea Real Británica (RN1) (STEELE-PERKINS, 1978) y 300 pilotos de la Marina Real Británica (RN2) (TORMES, 1974).

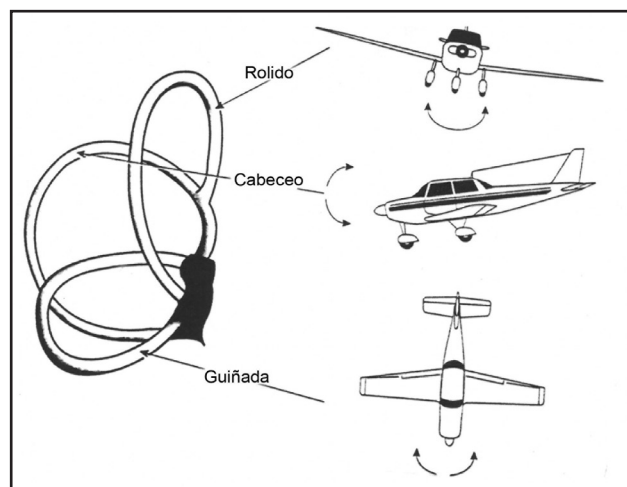
Tabla 2: Porcentaje de pilotos que tuvieron experiencia de desorientación, basado en el análisis de cuestionarios.

Clasificación	SN	RN1	RN2
Sensación de que no está nivelado después de hacer una curva.	91	96	94
Error en la posición relativa o movimiento de la nave en aproximación nocturna.	58	73	74
Error en la interpretación del horizonte verdadero en maniobra dentro de nube.	47	46	45
Error de interpretación de la altitud enseguida del despegue de la nave.	21	34	38
Error de interpretación del horizonte verdadero por observar luces en tierra.	33	28	15
Sensación de estar suspendido en el Espacio.	*	19	16
Sensación de inestabilidad (equilibrándose en el filo de la navaja).	*	*	18

Fuente: adaptado de Tormes (1974) y Steele-Perkins (1978).

Las desorientaciones espaciales pueden ocurrir debido a la ilusión por aceleración lineal o ilusión por aceleración rotacional, foco de este estudio. La porción del aparato vestibular responsable por la percepción del equilibrio rotacional son los canales semicirculares, del oído interno, situados cerca del utrículo y el sáculo. Los canales semicirculares son divididos en: anterior, posterior y horizontal, siendo dispuestos en ángulos rectos entre sí, representando los tres planos cartesianos del espacio. Cada canal semicircular tiene una dilatación en una de sus extremidades, llamada de ampolla, donde se localiza su transductor mecánico/eléctrico, la cresta ampollar. Cada cresta ampollar contiene células ciliares, y en su porción superior, hay una masa gelatinosa llamada cúpula, recubierta con células pilosas. Bañando la cresta ampollar, existe la endolinfa (líquido que llena los canales semicirculares, en su porción membranosa). El flujo de la endolinfa en la ampolla, generado por la inclinación de la cabeza, estimula las células ciliadas, indicando la dirección del movimiento. La ilusión por aceleración rotacional, como puede ser vista en la Figura 1, muestra la relación de los canales semicirculares del sistema vestibular humano con los tres planos espaciales cartesianos y los movimientos de la aeronave.

Figura 1: Planos espaciales.

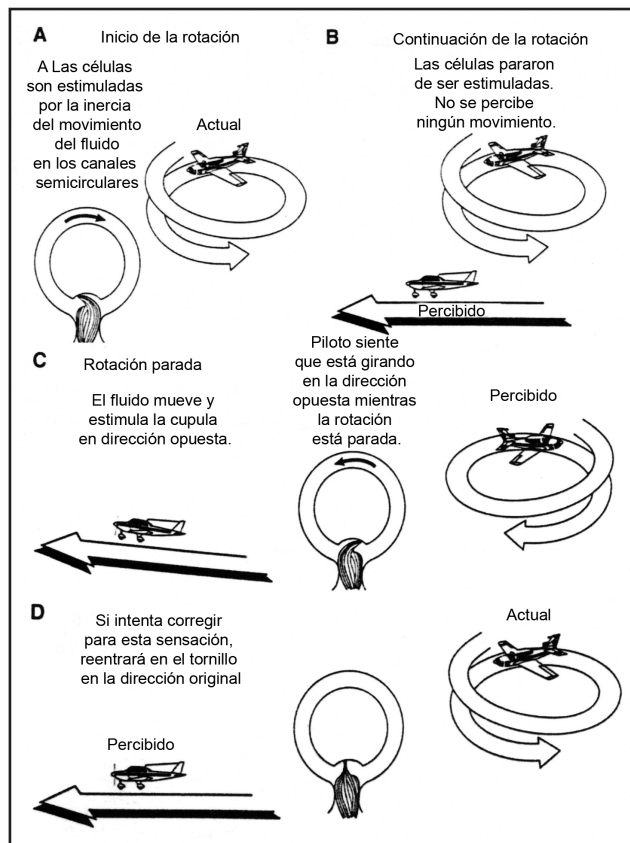


Fuente: Piedade (2001).

Una ilusión común del sistema vestibular (*Graveyard Spin*), asociada a la aceleración rotacional, ocurre cuando el piloto hace un tornillo en una dirección de giro y los canales semicirculares identifican la dirección del tornillo, haciendo que el piloto perciba la rotación. Después de algunos segundos, si no hay variación en la magnitud de la aceleración, la sensación

de rotación va disminuyendo hasta desaparecer, dando la impresión de que la aeronave no está más en curva. Cuando el piloto sale de la maniobra, por inercia, la endolinfa, que continua girando flexionando la cresta ampollar (transductor), da la falsa impresión de que el individuo está girando en dirección opuesta (sensación de que el piloto corrigió demasiado el giro). En ese momento, el piloto vuelve a girar en la dirección original, sin salir del tornillo, ocasionando el accidente. En la Figura 2A, la cúpula, estructura de los canales semicirculares responsable por identificar el movimiento rotacional, es estimulada por la inercia de la endolinfa y, en la Figura 2B, la aceleración angular es nula y el movimiento no es percibido. Al nivelar el avión, el piloto percibe, por la inercia de la endolinfa, un sentido de giro opuesto al de la maniobra, y la sensación es de que el giro fue hecho erróneamente (Figura 2C). El piloto entonces corrige la falsa percepción, entrando nuevamente en tornillo, en la dirección original (Figura 2D).

Figura 2: (A) Inicio de la maniobra, (B) continuación, (C) nivelado del avión, (D) desorientación espacial.



Fuente: Piedade (2001).

La desorientación espacial, sin embargo, no se restringe a la interacción ambiente, hombre

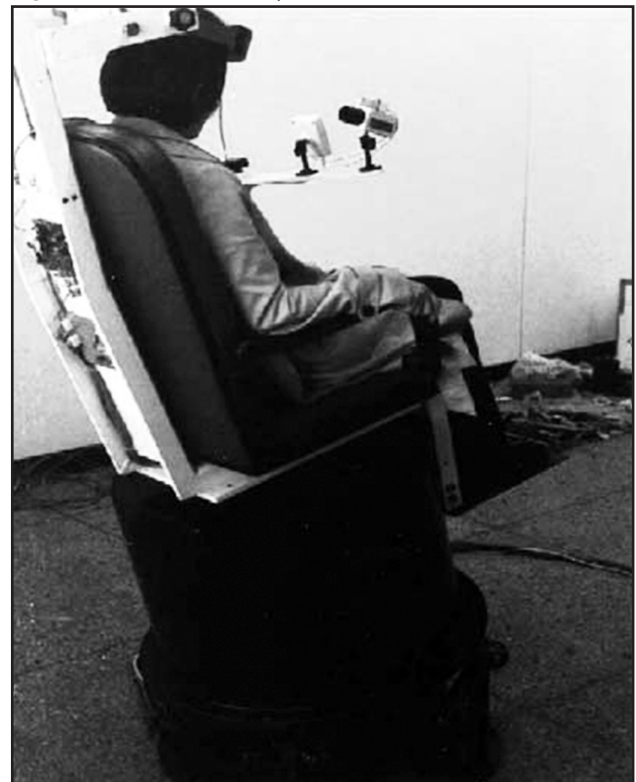
y avión. Helicópteros también son blancos de estudios, pues pueden ocasionar los mismos tipos de desorientación espacial (STEELE-PERKINS, 1978; TORMES, 1974).

3.2 Simulador de desorientación espacial – concepto de Bárány

El SDE es un dispositivo utilizado para realizar pruebas de desorientación espacial, particularmente para pilotos y estudiantes de facultades de ciencias aeronáuticas.

Ko (2003) muestra el desarrollo del modelo y sistema de control para SDEs descentralizados, donde el reflejo vestibulo-ocular es mensurado por medio de cámaras (Figura 3).

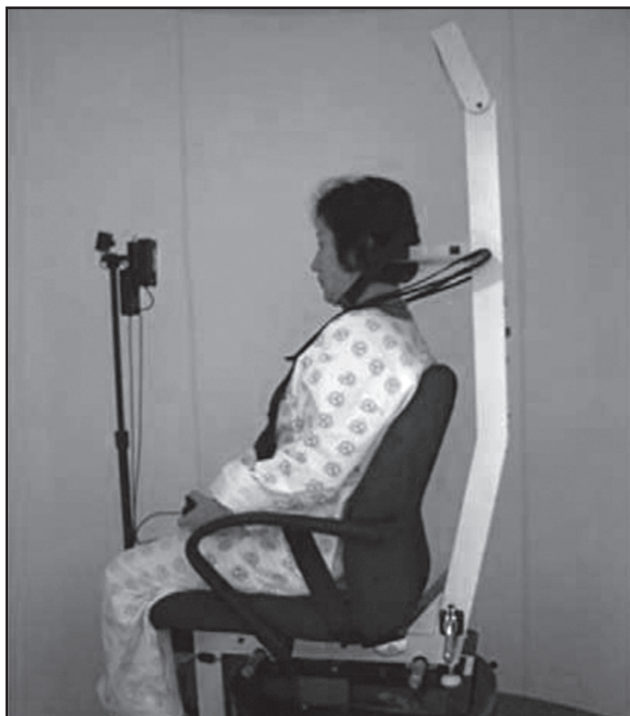
Figura 3: Silla rotatoria con plano inclinado.



Fuente: Ko (2003).

Algunas empresas especializadas ya ofrecen en el mercado diferentes SDEs . Enticott (2005) y Byun (2010) demuestran la utilización del dispositivo Micromedical Technologies System 2000 Rotational Chair, donde se exploran diferentes protocolos de rotación para estímulo de la desorientación (Figura 4).

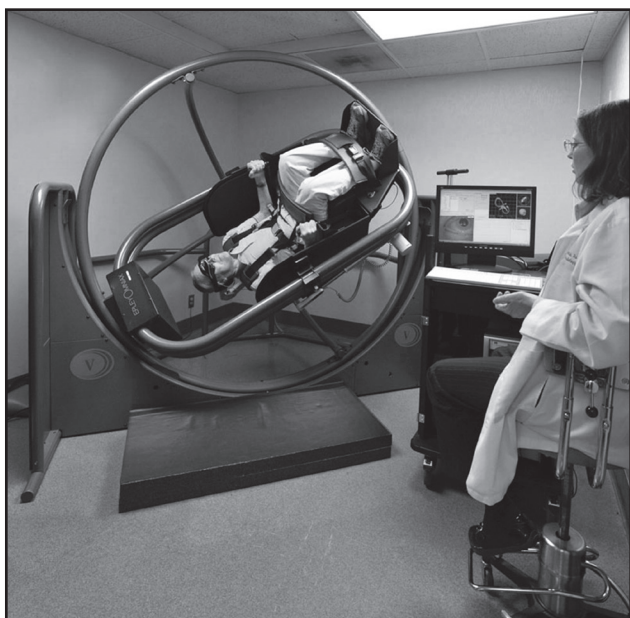
Figura 4: Dispositivo de Micromedical Technologies System 2000.



Fuente: Byun (2010).

El Epley Omniax, desarrollado por la empresa Vesticon, posibilita, además de la rotación, la inclinación del paciente de 0° a 360° (Figura 5).

Figura 5: Sistema Epley Omniax® de la empresa Vesticon.



Fuente: Vesticon (2014).

Complementariamente al estímulo y mensuración de la desorientación por el movimiento ocular, algunos equipamientos ya posibilitan la evaluación del individuo

en situaciones simuladas, como el vuelo. El GAT-II de Enviromenmtal Tectoniks emplea un simulador de vuelo y una versión estilizada de una cabina de aeronave para crear un ambiente más parecido al vuelo real (Figura 6).

Figura 6: Sistema de entrenamiento GAT-II desarrollado por la empresa Environmental Tectonics Corporation.



Fuente: Embry-Riddle (2014).

En la PUCRS, basado en la necesidad del entrenamiento práctico de los alumnos en fisiología aeroespacial y de realizarse la simulación de las condiciones enfrentadas por astronautas, el Centro de Microgravedad de la Facultad de Ingeniería (FENG) de la Pontificia Universidad Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), por medio de su Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial, desarrolló, en 2001, su primer prototipo del SDE (PIEDADE, 2001), siendo ese posteriormente perfeccionado por Gessinger (2005), Alves (2008) y por el presente estudio.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de definir el perfeccionamiento necesario para el sistema de desorientación, se realizó un relevamiento de las limitaciones presentadas por el *hardware* y *software* de control y por la estructura mecánica del SDE. Con la conclusión de esta etapa, fueron definidas cuales mejoras que serían contempladas.

Así, por medio de la revisión de los estudios realizados en el Centro de Microgravedad por Piedade (2001), Gessinger (2005), Russomano (2005) y Alves (2008) se comparó las principales limitaciones apuntadas en los protocolos desarrollados y en los resultados obtenidos sobre la desorientación de los voluntarios. De forma de enriquecer los datos encontrados, fueron organizadas discusiones multidisciplinarias con integrantes del Laboratorio de Fisiología Aeroespacial, del grupo de ingeniería biomédica del Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial y de la Coordinación de Investigación y Desarrollo e Innovación del Centro de Microgravedad.

4.1 Materiales

Los materiales utilizados en este estudio para perfeccionar el Simulador de Desorientación Espacial serán presentados y descritos a continuación.

4.1.1 Sistema de desorientación espacial

La primera versión del SDE (Figura 7A) del Centro de Microgravedad de la PUCRS fue idealizada por Piedade (2001) y poseía un conjunto motor externo, adaptado en el eje de la silla, compuesto de corona, piñón y cadena. Internamente, en el eje central de la estructura, fue adaptado un par de cojinetes de empuje, con el fin de disminuir la fricción del eje del motor. Para fijar el asiento, se soldó una chapa en la parte superior del eje central, en el cual el mismo fue atornillado. De forma de minimizar el desbalanceo de la silla y posibilitar una mayor seguridad del voluntario durante el giro, fueron introducidos un apoyo para la cabeza, un soporte para los pies y un cinto de dos puntos. El sistema de transmisión de fuerza consistía en un motor eléctrico de corriente continua de 24 V, con rotación nominal de 3000 rpm y factor de reducción de 15:1. La transmisión de movimiento entre el motor y el eje fue posibilitada por medio de dos poleas de canal trapezoidal, con una correa de perfil trapezoidal "A29", generando una relación de 5:1 entre la polea motora y la movida y una rotación final máxima del sistema de 40 rpm. El control del motor fue realizado por un circuito PWM (*Pulse-Width Modulation*), en una frecuencia de 10 kHz y con capacidad de ofrecer hasta 10 A de corriente. El mismo era alimentado

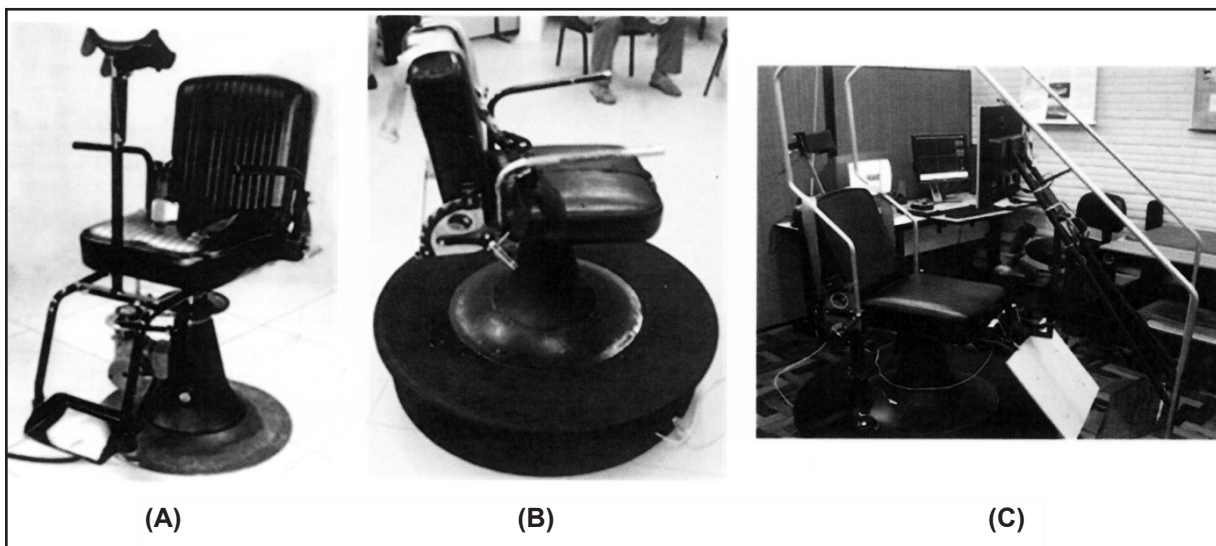
por una fuente de tensión con entrada de 220 V_{CA} y una salida ajustable de 24 V_{CC}.

El sistema era instrumentado con un tacómetro, compuesto de un generador de tensión microprocesado por un controlador 89C2051, el cual ofrecía la información del número de vueltas por medio de la variación de un nivel de tensión eléctrica.

La segunda versión (Figura 7B), perfeccionada por Gessinger (2005), introdujo una plataforma circular de madera, con revestimiento acústico interno, utilizada como sustentación para la silla. El conjunto motor fue movido para dentro de la plataforma, reduciendo considerablemente los ruidos de la transmisión y dando mayor estabilidad a la silla. Esa reducción permitió evitar que el voluntario obtuviese un punto sonoro de orientación espacial. En los laterales del asiento, fue adaptada una traba dentada de seguridad, en acero 1020, escalonada en intervalos de 15°, la cual posibilitó el ángulo del respaldo de la silla entre 0 y 90 grados. Otro recurso agregado fue un apoyo para piernas y pies, que, junto con la inclinación del respaldo, permitió utilizar la posición supino durante los experimentos. Un cinto de cinco puntos fue incluido en la estructura, en sustitución al anterior, asegurando una mayor estabilidad al voluntario, independientemente del ángulo de reclino utilizado en la silla.

La tercera versión (Figura 7C), desarrollada por Alves (2008), promovió una modernización de la instrumentación de la silla, posibilitando una evaluación más abarcadora de las respuestas fisiológicas del voluntario, así como su performance, en las diversas situaciones previstas en vuelo.

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



Fuente: Alves (2008).

Con el objetivo de crear un ambiente de *cockpit* en la silla, fue desarrollada una estructura utilizando tubos de aluminio para soporte de una cobertura en cuerina engomada (*blackout*), en color beige, minimizando factores de influencia del medio externo (sonido, aire y, principalmente, luminosidad). En esa estructura, fueron fijados un monitor LCD de 19 pulgadas y un *joystick*, con interface USB, permitiendo al voluntario, por medio del *software Flight Simulator X da Microsoft®*, controlar el *joystick* de un árbol virtual en diferentes escenarios simulados de vuelo. Fue instalada una cámara con luz infrarroja para capturar imágenes del voluntario durante los experimentos, con el objetivo de evaluar las reacciones del mismo. Para transmisión de datos USB, fue utilizado un aparato WUSB (*Wireless USB*) que es una versión inalámbrica de un HUB con puertos USB, para la transmisión de energía para los equipamientos utilizados como monitor, HUB USB inalámbrico y la unidad de dos contactos para hasta 4 A.

Para la realización de los perfeccionamientos identificados como necesarios para un mejor funcionamiento del SDE del Centro de Microgravedad-PUCRS, se realizó la adquisición de dos materiales: un moto-reductor y un inversor de frecuencia.

Fue escogida un Moto-reductor angular *Spiroplan®* (*SEW Eurodrive - WF10 DT56M4*), con alimentación de 380V (trifásico) y potencia de 0,1 kW,

la cual permite una rotación de hasta 1640 rpm a 60 Hz, una reducción de 8:1.

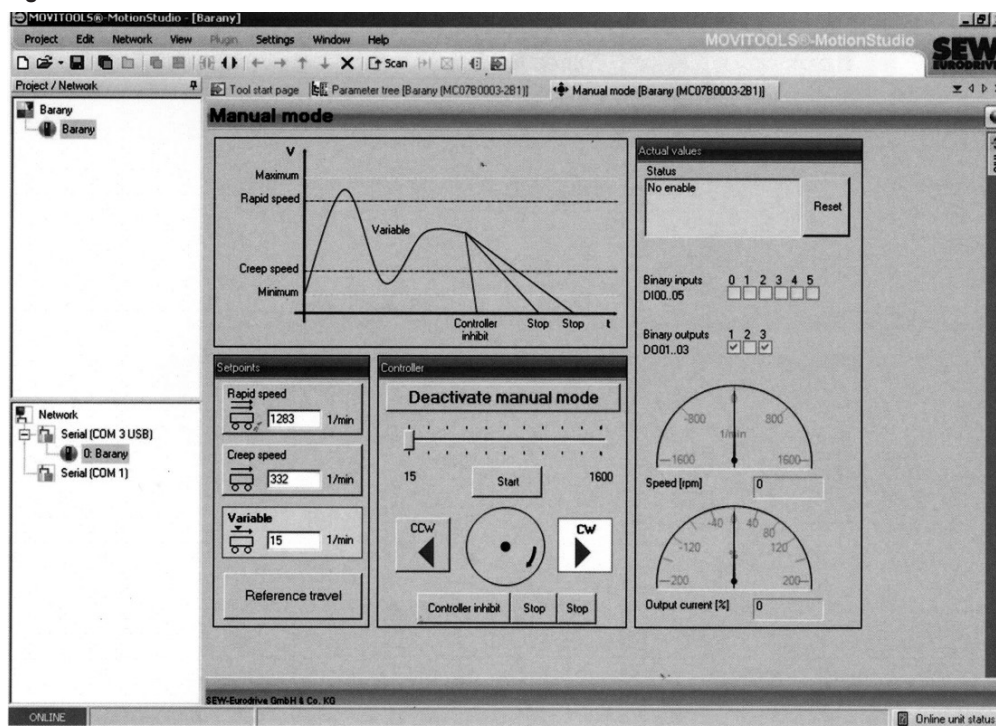
Para el control de accionamiento, aceleración y velocidad de rotación del motor, fue utilizado un inversor de frecuencia *MOVTRAC®* (*SEW Eurodrive MC07B0003-2B1-4-00*), con potencia de 250 W, conexión de red trifásica de 380 VCA.

El sistema posee un control manual (*SEW Eurodrive FBG11B*) que permite la programación de las condiciones de rotación del moto-reductor (rotación máxima deseada, tipo de motor y rampas de aceleración y desaceleración). Además del control manual, el inversor también posee interface RS485/Sbus - FSC11B para computadora, que posibilita el control del mismo por el aplicativo *Movitools MotionStudio v. 5.70 da Sew-Eurodrive* conforme Figura 8. A través de él, pueden ser configurados remotamente todos los parámetros disponibles en el inversor.

4.2 Métodos

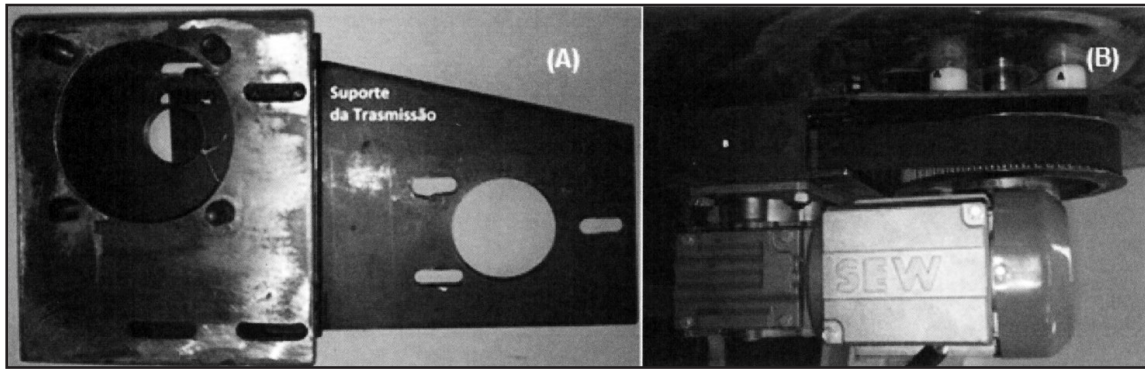
Fueron realizadas, en relación al proyecto desarrollado por Alves (2008), tres modificaciones principales en el proyecto del SDE: actualización del sistema de control, confección de un nuevo soporte para el motor y la reforma del sistema mecánico de sustentación y giro de la silla. El límite de masa de los voluntarios fue establecido en 90 kg.

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



Fuente: El autor.

Figura 9: Soporte de fijación para el motor eléctrico. (A) soporte de fijación, (B) conjunto de transmisión.



Fuente: El autor.

4.2.1 Actualización del sistema de control

Fueron removidos del sistema existente el motor de corriente continua y el sistema de control por modulación de ancho de pulso (PWM), siendo sustituidos por el moto-reductor instrumentado y por el inversor de frecuencia digital adquiridos. De esa forma, el control de parámetros, como velocidad de rotación, rampas de aceleración y desaceleración y límites de potencia entregados al motor pasaron a ser configurados por medio del aplicativo para *Windows MotionStudio v. 5.70*.

4.2.2 Confección del soporte para el motor

Para fijar el nuevo motor, fue necesaria la confección de un soporte. La pieza fue diseñada con ayuda del software *Solidworks®* y, entonces, fue construido un *mock-up* en madera MDF para realización de los ajustes necesarios. El soporte, en su versión final, fue confeccionado en acero carbono 1020, con espesor de 6,35 mm, y soldado con electrodo revestido 6013. Después de la finalización de esa etapa, el soporte fue fijado junto con el moto-reductor y la transmisión entre el motor y el eje de la silla. Dos poleas de canal trapezoidal y de correa de perfil trapezoidal modelo "A29", presentes en el proyecto anterior, fueron utilizadas, produciendo una relación de 5:1 entre el motor y el eje. En la Figura 9A puede ser visualizado el soporte de fijación y en la Figura 9B el conjunto de transmisión montado.

4.2.3 Reforma del sistema mecánico

Fue necesario reformar la estructura mecánica de forma a solucionar problemas de folga, principalmente axial y radial en los mancales de deslizamiento y rodamiento. Esa holgura generaba vibraciones durante el giro, posibilitando la percepción del movimiento por el

voluntario durante experimentos. Así, fueron realizadas las siguientes modificaciones:

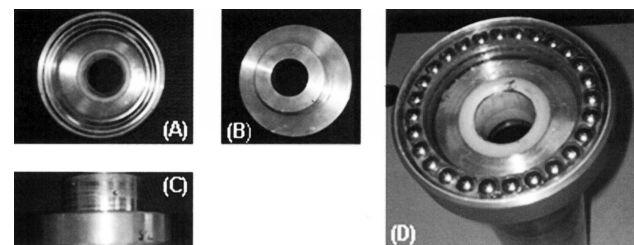
1) la fijación del eje en la cadera; 2) la remanufactura del eje y; 3) la reforma de los cojinetes de rodamiento y deslizamiento.

En la base de sustentación del asiento de la silla, fue atornillado un disco de acero SAE 1020. En ese disco, fue fijado un bloque circular de acero y ese, por su parte, fue soldado eléctricamente al eje de la silla, posibilitando, así, una mayor estabilidad durante el movimiento.

El nuevo eje fue confeccionado en acero SAE 1020 en un torno mecánico, con 900 mm de longitud y 30 mm de diámetro externo, poseyendo una perforación interna pasante. Esa perforación, además de disminuir el peso, aumentó la resistencia a la solicitud de flexión.

La estructura presenta cojinetes del tipo mixto (rodamiento y deslizamiento), siendo el rodamiento axial de esferas de abrazadera simple. En el centro de la pieza, había un taco de nylon, el cual funcionaba como cojinete de deslizamiento y, al mismo tiempo, de guía para el eje. Las modificaciones realizadas se concentraron en el cojinete (Figura 10), cuyo posicionamiento fue invertido, disminuyendo la interferencia mecánica y, así, mejorando la performance del giro del eje. Se aumentó el diámetro del taco de nylon, por intermedio de un alargador, de forma de ajustarse al diámetro del nuevo eje.

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



Fuente: El autor.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Comparativamente con el SDE desarrollado por este proyecto, las soluciones presentadas por Ko (2003) y Byun (2010) no permiten el movimiento del individuo para realizar oscilaciones de cabeza, utilizadas por diferentes protocolos de investigación. Además, las soluciones demostradas por Vesticon (2014) y Embry-Riddle (2014), a pesar de poseer mayor número de recursos, exigen un amplio espacio físico y mayor infraestructura y entrenamiento para su operación.

El SDE del Centro de Microgravedad, desde su primera concepción en 2001, sufrió evoluciones alineadas a las necesidades de investigaciones propuestas en el campo de la desorientación espacial y del entrenamiento de estudiantes y pilotos en la comprensión de sus efectos en el ser humano.

Entre las investigaciones realizadas, la evaluación de medicamentos en el combate a los síntomas de la cinetosis aeroespacial realizado por Russomano (2005) y el respectivo análisis de la performance cognitiva resultante de esa asociación, investigado por Subasinghe (2013), posibilitaron un mejor entendimiento de esos efectos. La aplicación de incrementos tecnológicos y electrónicos también brindó la oportunidad de buscar la cuantificación de la desorientación espacial.

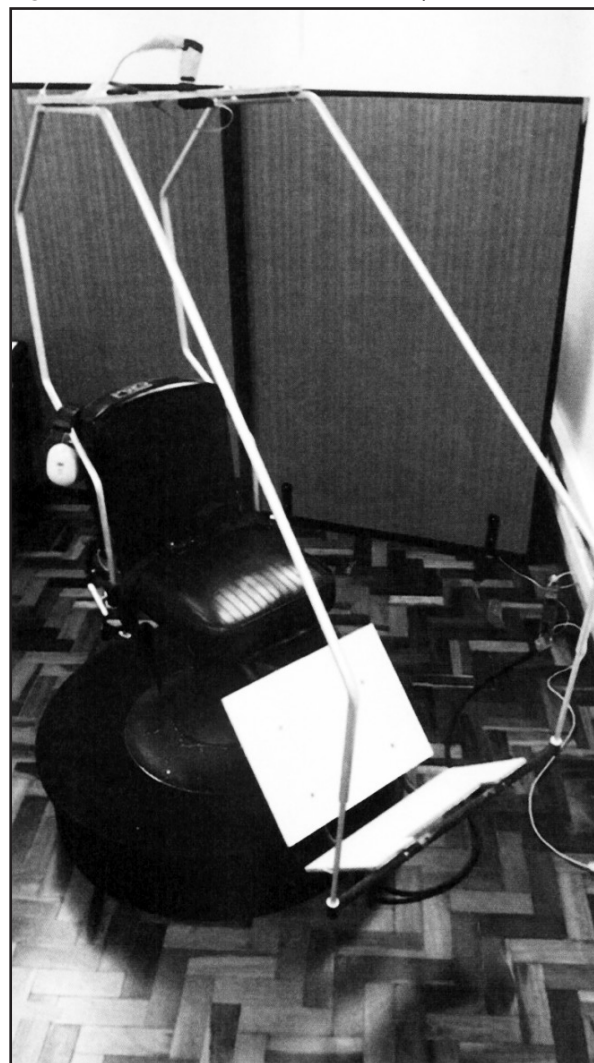
El SDE presentado en el presente artículo (Figura 11) posibilita el establecimiento de un protocolo de testes fisiológicos más preciso, pues permite el control de las rampas de aceleración y desaceleración (control proporcional e integral) del movimiento rotatorio. En comparación con el sistema basado en PWM y motor de corriente continua utilizado por Alves (2008), el inversor de frecuencia y motor de corriente alterna del presente sistema permitieron el cambio del sentido de giro y una torsión más constante en el eje.

El *software Movitools MotionStudio v. 5.70 de Sew-Eurodrive*, fabricante de ese motor e inversor, posibilitó el acceso a una interface de control más completa, pero accesible, en que el usuario puede modificar las variables de configuración de forma rápida y amigable. En la versión anterior, una interface compuesta por un potenciómetro y dos *displays* de siete segmentos permitía solamente definir la rotación por minuto deseada y verificar la rotación actual.

La remanufactura del eje de la silla y de sus cojinetes trajo una mayor estabilidad del movimiento, tornando el SDE más fluido y silencioso y, así, facilitando la desorientación del voluntario, que pasó a tener menos referencias externas cuando se compara con las versiones anteriores.

El SDE desarrollado fue utilizado con éxito para la realización de un estudio con seres humanos, el cual evaluó la variación de la performance cognitiva de los voluntarios cuando son expuestos a la desorientación por rotación, en una investigación en cooperación con el grupo del *Centre of Human Aerospace and Physiological Sciences (CHAPS), King's College London*, del Reino Unido.

Figura 11: Simulador de Desorientación Espacial actual.



Fuente: El autor.

6 CONCLUSIÓN

Simuladores de desorientación espacial son una herramienta valiosa en el estudio de la respuesta fisiológica humana al conflicto de informaciones recibidas por los sistemas vestibular, visual, auditivo y táctil durante vuelos aéreos, especialmente a la noche o en situaciones de baja luminosidad.

El SDE desarrollado por el Centro de Microgravedad y presentado en ese trabajo es el resultado de más de una década de experiencia en la realización de investigaciones internacionalmente reconocidas sobre desorientación espacial.

El frenado magnético, la inversión de dirección de movimiento y el control fino de velocidad y aceleración, características presentes solo en esa versión del simulador, posibilitaron al SDE atender a las necesidades establecidas por protocolos de investigaciones clínico-fisiológicas.

Para proyectos futuros, se sugiere la inclusión de un sistema de realidad virtual para ampliar las aplicaciones del SDE y el cierre de la malla de control por medio de la inclusión de encoders de posición absoluta.

REFERENCIAS

- 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.
- PIEDADE, 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.