

# Desenvolvimento de uma Câmara de Hipóxia Normobárica para Estudos em Fisiologia Humana

*Development of a Normobaric Hypoxia Chamber for Studies in Human Physiology*

*Desarrollo de una Cámara de Hipoxia Normobárica para Estudios en Fisiología Humana*

Endrigo Rosa de Carvalho<sup>I</sup>

Leandro Disiuta<sup>II</sup>

Eloy Vicente De La Barra Velasquez<sup>III</sup>

Júlio Cesar Marques de Lima<sup>IV</sup>

Thais Russomano<sup>V</sup>

## RESUMO

Um dos grandes desafios enfrentados por aviadores é perceber os efeitos fisiológicos individuais causados pela hipóxia. A hipóxia é a condição que o corpo humano enfrenta quando não recebe um adequado suplemento de oxigênio nos tecidos e células do corpo. A privação de oxigenação adequada ocasiona, a redução da capacidade cognitiva e visual, podendo, em casos extremos, levar à inconsciência e ao óbito. Portanto é necessário que os aviadores recebam treinamento com o objetivo de reconhecerem tais sintomas, a fim de garantirem a segurança de voo. Este artigo descreve o desenvolvimento de uma Câmara de Hipóxia Normobárica (CHN) portátil e de baixo custo. A CHN possibilita treinamento em situações de hipóxia para aviadores. Para ser portátil e de baixo custo, a CHN foi construída por meio de uma estrutura em tubos de PVC, revestida com lona vinílica transparente e dotada de fechos para acessar e isolar a atmosfera interna da câmara do restante do ambiente. O sistema de controle da CHN foi projetado para adquirir sinais dos sensores de O<sub>2</sub> e

CO<sub>2</sub>, processar e controlar o *hardware* dos atuadores responsáveis pela mistura gasosa, que permitem alterar a concentração de oxigênio no interior da CHN, e homogeneizar o ar dentro da CHN e realizar a exaustão do interior da câmara. Os resultados obtidos mostram que o desenvolvimento da CHN cumpriu os pré-requisitos estabelecidos no projeto. A CHN pode ser utilizada na capacitação de aviadores em condições controladas e na realização de pesquisas em fisiologia humana, relacionadas à hipóxia.

**Palavras-chave:** Câmara hipóxia normobárica. Alterações fisiológicas. Treinamento em hipóxia. Segurança de voo.

## ABSTRACT

*One of the great challenges faced by aviators is to realize the individual physiological effects caused by hypoxia. Hypoxia is the condition that the human body faces when it does not receive an adequate supplement of oxygen in the body tissues and cells. Deprivation of appropriate oxygenation leads to reduced cognitive and visual capacity,*

I. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Mestre em Engenharia Elétrica pela PUCRS. *E-mail:* endrigorcarvalho@gmail.com

II. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Doutorando em Engenharia Aeroespacial pela University of Tasmania (UTAS) – Austrália. *E-mail:* ldisiuta@gmail.com

III. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Mestre em Engenharia Elétrica pela PUCRS. *E-mail:* eloy.velasquez@gmail.com

IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Doutorado em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). *E-mail:* prof.julio.lima@gmail.com

V. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Phd em *Space Physiology* pela King's College London (KCL) – Grã-Bretanha. *E-mail:* trussomano@hotmail.com

Recebido: 23/08/2016

Aceito: 08/12/2017

thereby leading to unconsciousness and even death in extreme cases. It is therefore required that aviators receive training to recognize such symptoms to ensure flight safety. This paper describes the development of a portable and low cost Normobaric Hypoxia Chamber (NHC). The NHC provides training in situations of hypoxia for aviators. To be portable and cost-effective, the NHC was constructed using a PVC pipe structure, coated with transparent vinyl canvas and fitted with latches to access and seal the internal atmosphere of the chamber from the rest of the environment. The NHC control system was designed to acquire signals from  $O_2$  and  $CO_2$  sensors, to process and control the hardware of the gas mixture actuators, which allow the oxygen concentration within the NHC to be changed, and to homogenize the air within the NHC and carry out the exhaustion of the interior of the chamber. The results show that the development of the CHN has fulfilled the prerequisites established in the project. The NHC can be used to train aviators under controlled conditions and to carry out research on human physiology related to hypoxia.

**Keywords:** Normobaric hypoxia chamber. Physiological changes. Training in hypoxia. Flight safety.

## RESUMEN

Uno de los grandes desafíos enfrentados por los aviadores es percibir los efectos fisiológicos individuales causados por la hipoxia. La hipoxia es la condición que el cuerpo humano se enfrenta cuando no recibe un adecuado suplemento de oxígeno en los tejidos y las células del cuerpo. La privación de oxigenación adecuada ocasiona la reducción de la capacidad cognitiva y visual, pudiendo, en casos extremos, llevar a la inconsciencia y al óbito. Por lo tanto es necesario que los aviadores reciban entrenamiento con el objetivo de reconocer tales síntomas, a fin de garantizar la seguridad de vuelo. En este artículo se describe el desarrollo de una Cámara de Hipóxia Normobárica (CHN) portátil y de bajo costo. La CHN posibilita entrenamiento en situaciones de hipoxia para aviadores. Para ser portátil y de bajo costo, la CHN fue construida a través de una estructura en tubos de PVC, revestida con lona vinílica transparente y dotada de cierres para acceder y aislar la atmósfera interna de la cámara del resto del ambiente. El sistema de control de CHN está diseñado para adquirir señales de los sensores de  $O_2$  y  $CO_2$ , procesar y controlar el hardware de los actuadores responsables de la mezcla gaseosa, que permiten variaciones en la concentración de oxígeno dentro de la CHN y mezclar el aire dentro de la CHN y realizar el agotamiento del interior de la cámara. Los resultados obtenidos muestran que el desarrollo de

CHN cumplió los requisitos previos establecidos en el proyecto. La CHN puede ser utilizada en la capacitación de aviadores en condiciones controladas y en la realización de investigaciones en fisiología humana, relacionadas a la hipoxia.

**Palabras clave:** Cámara hipoxia normobárica. Alteraciones fisiológicas. Entrenamiento en hipoxia. Seguridad de vuelo.

## 1 INTRODUÇÃO

A hipóxia, caracterizada pelo inadequado suprimento de oxigênio ( $O_2$ ) para os tecidos e células do corpo, é uma condição com a qual os aviadores podem se deparar, devido a falhas ocorridas em uma aeronave. Como os sintomas de hipóxia variam de indivíduo para indivíduo, é necessário que os tripulantes conheçam seus próprios sinais e sintomas, de modo a permitir uma possível antecipação de ações corretivas, caso ocorra essa emergência em voo.

Na aviação, estatisticamente, o tipo de hipóxia com maior número de ocorrências é a hipóxia hipóxica, também conhecida como hipóxia de altitude. Essa situação é causada pela diminuição da pressão atmosférica, principalmente devido ao aumento de altitude, uma vez que naturalmente há uma diminuição na pressão parcial do oxigênio. A hipóxia da altitude tem como principais sinais e sintomas a diminuição gradativa da visão, a hiperventilação, o aumento dos batimentos cardíacos, a diminuição das funções psicomotoras, a perda de discernimento, a semiconsciência ou mesmo a inconsciência e, em situações mais graves, pode levar ao óbito (RUSSOMANO, 2012).

Embora acidentes aeronáuticos devido à hipóxia de altitude sejam raros (SELF et al., 2010), pode-se citar alguns casos de descompressão da aeronave que resultaram em hipóxia, como no caso do acidente que ocorreu com o famoso golfista norte-americano *Payne Stewart*, no dia 25 de outubro de 1999, em Dakota do Sul (CABLE, 2003). Outro caso, com características similares, ocorreu em 2 de agosto de 2005, com a aeronave da companhia *Cipriota Helios Airways*, em que morreram 110 passageiros e 8 tripulantes.

Conforme a *Federal Aviation Administration* (FAA – Administração Federal de Aviação) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), órgãos do governo norte-americano e brasileiro, respectivamente, faz-se necessário que os cursos de formação de pilotos tenham disciplinas

referentes à medicina aeroespacial, porém somente é exigido o conhecimento teórico conforme **MCA 58 – Manual de Curso Piloto Comercial – Avião** desenvolvido pelo então Ministério da Aeronáutica (BRASIL, 2013a).

O presente artigo trata do desenvolvimento de uma Câmara de Hipóxia Normobárica (CHN) capaz de simular a hipóxia em condições normais de pressão, por meio da oferta de uma atmosfera com baixa concentração de oxigênio, para quem estiver no interior da CHN, concentração essa que pode ser ajustada conforme a altitude que se deseje simular. A utilização dessa Câmara permite que pilotos e sua tripulação possam realizar um treinamento prático, de forma a testar e conhecer seus próprios limites e saber identificar os sintomas em condição de hipóxia, de modo a agir corretamente em situações reais de emergência em voo. A CHN também permite o treinamento de atletas (de alto rendimento) para um melhor condicionamento físico e adaptação à altitude (situação muito comum, por exemplo, com jogadores de futebol), além de pesquisas relacionadas à fisiologia humana e ao processo de envelhecimento.

A CHN possui características interessantes, como a possibilidade de treinamento simultâneo de mais de um indivíduo, além um sistema de controle automático que permite a simulação de diferentes altitudes com a diminuição da concentração de oxigênio. Buscando-se desenvolver uma CHN com características diferenciadas em relação às disponíveis comercialmente, a estrutura da câmara foi concebida para ser leve, fácil de montar, desmontar e transportar, podendo a mesma ser instalada em diversos locais (sem necessitar de instalação especial), bem como ser de baixo custo.

A construção da CHN teve por objetivo tornar mais real a simulação de hipóxia atualmente realizada no Centro de Microgravidade da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), a qual utiliza uma Máscara de Hipóxia (para diminuição da oferta de oxigênio), pois em uma situação real de emergência em voo, a máscara, de forma contrária, será a fonte adequada de oxigênio para que os tripulantes eliminem os efeitos da hipóxia de altitude. Portanto, para melhorar o treinamento em relação às ações que devem ser executadas pelos tripulantes, o ideal é utilizar-se um ambiente **real**, simulado por uma câmara fechada, onde a atmosfera tem baixa concentração de oxigênio e no qual poderão ser adaptados simuladores de voo e outros experimentos para avaliar a concentração e alterações do processo cognitivo da tripulação.

Na literatura científica, é possível encontrar diversos estudos sobre a hipóxia da altitude, nos quais são descritos os sinais e sintomas que ocorrem nos seres humanos submetidos a uma atmosfera com baixa concentração de oxigênio. Nesses trabalhos, sempre é enfatizado o fato de que cada indivíduo tem uma reação diferente quando submetido à hipóxia hipóxica (THE AVIATORS..., 2012), o que justifica a necessidade de um treinamento fisiológico prático para reconhecimento dos efeitos individuais e os perigos que os mesmos podem acarretar para a segurança de voo.

## 2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma Câmara de Hipóxia Normobárica no Centro de Microgravidade – MicroG, da PUCRS. No trabalho, são abordados concepção, design, componentes mecânicos e estruturais, incluindo-se como é gerada a mistura de ar com baixa concentração de oxigênio para os usuários, os instrumentos utilizados e o *software* adaptado para seu controle e mecanismos de segurança.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da CHN foi realizada uma revisão da literatura, onde se aborda os aspectos mais relevantes relativos à hipóxia na aviação, assim como os diferentes métodos de simulação de hipóxia e os equipamentos existentes.

### 3.1 Hipóxia

O oxigênio é a principal fonte de vida para o ser humano, responsável por fornecer energia para as células e tecidos. A diminuição de um adequado suprimento de oxigênio as células e tecidos, causada por diferentes fatores, é denominada de hipóxia. O ser humano exposto a essa situação pode ter uma severa deterioração dos sistemas corpóreos, principalmente células do sistema nervoso central (especialmente células do cérebro), ocasionando sintomas como redução das funções visuais, alterações psicomotoras e cognitivas e, em casos extremos, perda da consciência e morte (DAVIS et al., 2008; ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

O tipo de hipóxia que mais afeta aeronautas é conhecido como hipóxia hipobárica ou hipóxica, sendo

esta resultante de toda e qualquer ocorrência ambiental. Nessa, há uma redução na pressão arterial parcial de O<sub>2</sub> (PA<sub>O<sub>2</sub></sub>), ocasionando uma redução na difusão do oxigênio através da membrana alvéolo-pulmonar, que acarreta na diminuição da quantidade de gás disponível para a oxigenação dos tecidos e células. Esse tipo de hipóxia pode ocorrer de forma aguda, quando há uma exposição imediata a um ambiente pressórico menor, na qual não há tempo hábil para o organismo compensar os efeitos da hipóxia (por exemplo, descompressão em voo), ou ainda de forma crônica, onde há uma exposição progressiva, na qual existe um período de compensação do organismo. (por exemplo, escalada em montanha) (COSTA; PROTÁSIO; BRASILEIRO, 2009; ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012).

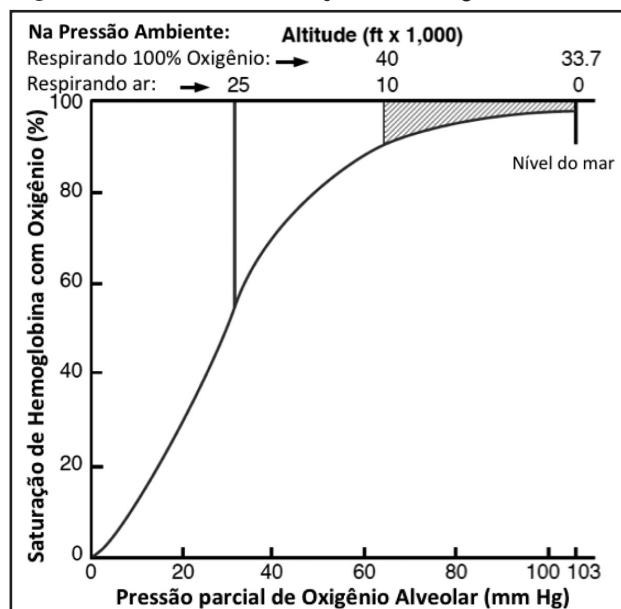
Com o aumento da altitude, há uma diminuição na pressão barométrica (Pb) e, conseqüentemente, na pressão parcial dos gases atmosféricos. A queda na pressão parcial do oxigênio inspirado (PI<sub>O<sub>2</sub></sub>) ocasiona uma redução na pressão parcial do oxigênio alveolar (PA<sub>O<sub>2</sub></sub>). A diferença entre PI<sub>O<sub>2</sub></sub> e PA<sub>O<sub>2</sub></sub> é mostrado na Equação 1 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

$$PI_{O_2} - PA_{O_2} = PaCO_2 \left( FI_{O_2} + \frac{1 - FI_{O_2}}{R} \right) \quad (1)$$

Onde o FI<sub>O<sub>2</sub></sub> representa a fração de oxigênio inspirado e R a taxa de respiração. PaCO<sub>2</sub> é produzida por meio da taxa de produção de CO<sub>2</sub> na ventilação alveolar. Essa taxa irá manter-se constante até 10,000 ft. Acima disso, a PA<sub>O<sub>2</sub></sub> cai para níveis que desencadeiam um estímulo respiratório via quimiorreceptores arteriais (hiperventilação). Esta é uma medida protetiva para minimizar os efeitos da hipóxia à queda da PA<sub>O<sub>2</sub></sub> e, conseqüentemente, na saturação das hemoglobinas, como pode ser visto na Tabela 1 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012).

A curva de dissociação da hemoglobina (Figura 1) (relação entre a curva de saturação de oxigênio - SpO<sub>2</sub> e PI<sub>O<sub>2</sub></sub>) mostra que até 10,000 ft uma grande elevação na altitude acarreta uma pequena variação de SpO<sub>2</sub> e, a partir de 10,000 ft, um pequeno aumento na altitude gera uma grande queda de SpO<sub>2</sub> e o agravamento nos sintomas da hipóxia (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

Figura 1 – Curva de dissociação da hemoglobina.



Fonte: Adaptado de Harding (2012).

Os sintomas da hipóxia hipobárica são divididos em quatro estágios. O **estágio indiferente** acontece do solo até 10,000 ft (ou do solo até 39,000 ft com suplementação de O<sub>2</sub> 100%), no qual o indivíduo se adapta sem a necessidade de suplementação de oxigênio. No entanto a visão é afetada, principalmente a noturna. Em um voo noturno a 5,000 ft, perde-se de 5% a 10% da visão, já a 10,000 ft, de 15% a 25% e acima de 12,000 ft, de 25%

Tabela 1 – Valores típicos para pressão e saturação da hemoglobina de um sujeito saudável exposto à hipóxia.

Altitude (ft)	Concentração de O <sub>2</sub> (%)	Pressão barométrica (Pb) (mm Hg)	Pressão parcial do O <sub>2</sub> inspirado (PI <sub>O<sub>2</sub></sub> ) (mm Hg)	Pressão parcial do O <sub>2</sub> no sangue arterial (PA <sub>O<sub>2</sub></sub> ) (mm Hb)	Saturação da hemoglobina (SpO <sub>2</sub> ) (%)
0,000	20,95	760	148	95	96
8,000	15,54	565	108	56	92
15,000	11,81	429	80	37	79
18,000	10,45	380	69	32	63
20,000	9,61	349	63	29	44

Fonte: Ernsting e Gradwell (2006).



a 30%. Também ocorre um aumento do metabolismo com maior queima calórica (COSTA; PROTÁSIO; BRASILEIRO, 2009; RUSSOMANO, 2012).

O **estágio compensatório** ocorre de 10,000 ft a 15,000 ft (ou de 39,000 ft a 42,500 ft com  $O_2$  100%). O organismo tende a compensar os efeitos da hipóxia por meio de respostas respiratória e cardiovascular, como a hiperventilação e o aumento dos batimentos cardíacos. Os principais sintomas são sonolência, alterações no julgamento, descoordenação motora, raciocínio mais lento, sensação de **bem-estar** (certa euforia), sendo essa a mais perigosa, pois não permite que o indivíduo tome providências mediante emergência (COSTA; PROTÁSIO; BRASILEIRO, 2009; RUSSOMANO, 2012).

O **estágio perturbado** é verificado de 15,000 ft a 20,000 ft (ou de 42,500 ft a 45,000 ft com  $O_2$  100%). Nele, a compensação realizada pelo organismo não é mais satisfatória. Os principais sintomas são hiperventilação acentuada, taquicardia e cefaleia intensa. Há alterações nas funções psicomotoras, como aumento significativo no tempo de reação, descoordenação muscular e descoordenação motora, alterações nas funções cognitivas, como debilitação da performance a novas tarefas, diminuição da memória de curto e longo prazos e raciocínio lógico, dificuldade na resolução de tarefas matemáticas simples, perda de julgamento e alteração na função visual como redução de percepção à intensidade luminosa. A acuidade visual é diminuída com pouca luz e perda da visão periférica (visão em túnel) (COSTA; PROTÁSIO; BRASILEIRO, 2009; RUSSOMANO, 2012).

No **estágio crítico** (acima de 20,000 ft ou 45,000 ft com  $O_2$  100%), há uma debilitação dos sistemas cardiopulmonar e nervoso, acentuação dos sintomas que acontecem no estágio perturbado. Há uma rápida diminuição do desempenho mental e pode ocorrer inconsciência com pouco ou nenhum sintoma, convulsões caracterizadas pelas contrações musculares que produzem opistótono (cabeça, braço, pescoço e

coluna vertebral formam uma posição de arco côncavo para trás), precedido ou seguido por um ou mais espasmos musculares, semiconsciência, inconsciência e morte (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

O intervalo entre a diminuição de demanda de oxigênio até o momento que o indivíduo perde a capacidade de tomada decisões (protetoras e corretivas) é chamado de Tempo de Desempenho Eficaz (TDE). Na prática, o conceito mais aceito é o período que o indivíduo afetado retém a habilidade para atuar na correção de situações difíceis (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

Um piloto que está a 15,000 ft terá 30 minutos ou mais para reconhecer os seus sintomas e (ou) sinais de hipóxia e tomar atitudes que salvem os passageiros e tripulantes de um acidente, porém esse mesmo piloto terá no máximo 20 segundos, caso esteja a 40,000 ft. O tempo de desempenho eficaz é mostrado na Tabela 2 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

### 3.2 Métodos de Simulação de Hipóxia Hipóxica

A hipóxia hipóxica pode ser gerada por duas formas. A primeira pela mudança na pressão ambiental, que acarretará uma diminuição na pressão parcial ( $PI_{O_2}$ ) que o oxigênio exercerá na difusão gasosa dos pulmões para o sangue. Esse tipo de ambiente pode ser simulado em câmaras hipobáricas. A segunda forma, que será utilizada na câmara desenvolvida nesse trabalho, é obtida pela mudança na fração do volume de oxigênio no ambiente. A fração do volume de oxigênio é diretamente proporcional à pressão parcial exercida por ele, sendo assim uma diminuição no volume de oxigênio irá, conseqüentemente, diminuir a pressão parcial exercida na difusão gasosa dos alvéolos para o sangue. Essa mudança ambiental pode ser simulada em câmaras normobáricas.

**Tabela 2** – Relação entre TDE, altitude e a concentração de  $O_2$ .

Altitude (ft)	Concentração de $O_2$ (%)	Tempo de desempenho eficaz TDE (s)
15,000	11,81	1800 ou mais
18,000	10,45	1200 a 1800
22,000	8,83	300 a 600
25,000	7,76	180 a 360
28,000	6,80	150 a 180
30,000	6,21	60 a 180
35,000	4,92	30 a 60
40,000	3,87	15 a 20
50,000	-	6 a 9

Fonte: Russomano (2012).

Conforme a *International Standard Atmosphere* (ISA – Atmosfera padrão internacional), os valores padrão para a pressão barométrica e a concentração de oxigênio ao nível do mar são de 760 mmHg e 21%, respectivamente. Em uma pessoa saudável, a saturação da hemoglobina ( $SpO_2$ ), ao nível do mar, é de aproximadamente 98% a 99% (RUSSOMANO, 2012).

### 3.2.1 Câmara de hipóxia normobárica (CHN)

A CHN ou tenda hipóxica consiste em uma sala em que há uma inserção de uma mistura gasosa, geralmente nitrogênio, com pressão igual à atmosférica. Como não há variação na pressão, a sua estrutura pode ser construída como uma barraca totalmente vedada, podendo ter estrutura de plástico ou alumínio e invólucro em nylon (COLORADO ALTITUDE TRAINING, 2010; HYPOXICO ALTITUDE TRAINING SYSTEMS, 2010).

Para este trabalho, foram pesquisadas câmaras hipóxicas desenvolvidas em universidades na Inglaterra e nos Estados Unidos. O *King's College London* possui uma câmara para pesquisas da fisiologia humana em ambientes extremos. Essa câmara possui aproximadamente 9m<sup>2</sup>, sendo construída em plástico PVC transparente com estrutura de alumínio, aberturas lacradas com zíperes (Figura 2), e com capacidade para 10 pessoas. A geração do ar empobrecido em oxigênio é feita por meio do equipamento da *Training With Altitude Air Generator* (TWAAG). O monitoramento de ar no interior da CHN é realizado por sensores de gases.

**Figura 2** – CHN do *King's College London* no Reino Unido.



**Fonte:** Os autores.

A *Embry-Riddle Aeronautical University* nos Estados Unidos também possui uma câmara de hipóxia

normobárica fabricada pela empresa *CAT Altitude Training*. Ela é construída com placas de polipropileno e estrutura de alumínio, sendo montada sobre uma estrutura de madeira elevada em relação ao chão, por onde é feita a passagem da fiação elétrica. Mede aproximadamente 9,6 m<sup>2</sup> e possui também uma antessala. Tem capacidade de utilização por 9 indivíduos, além da possibilidade de uso de simulador de voo. A geração de mistura gasosa é feita com o equipamento *CAT Air Unit*. O monitoramento é feito por dois sensores de oxigênio, um sensor de dióxido de carbono, um de pressão e um de temperatura (COLORADO ALTITUDE TRAINING, 2010).

### 3.2.2 Câmara de hipóxia hipobárica

A Câmara de hipóxia hipobárica (CHH) consiste em uma sala, na qual há uma diminuição pressórica ambiental. O seu funcionamento consiste em usar válvulas de vácuo para reduzir a pressão do interior da câmara, simulando a pressão ambiental correspondente à altitude desejada. Sua construção, seu funcionamento e sua manutenção envolvem maior complexidade e custos em relação às câmaras normobáricas hipóxicas, sem a possibilidade de mobilidade. A Figura 3 ilustra a Câmara Hipobárica da Força Aérea Brasileira (FAB).

**Figura 3** – CHH da Força Aérea Brasileira.



**Fonte:** Brasil (2013b).

Comparando a CHH e a CHN em relação à estrutura, a CHH tem uma estrutura extremamente complexa, robusta e pesada, ao contrário da CHN, que é mais leve, podendo ser modulável e facilmente transportável.

De acordo com Self (2010), foi concluído, após vários testes fisiológicos e parâmetros medidos, que a CHN é tão eficiente quanto a CHH para treinamento fisiológico em hipóxia, com a vantagem de ter muito menor custo e ser segura, pois diminui a chance de barotrauma e da doença da descompressão.

### 3.2.3 Máscara de hipóxia

As máscaras de hipóxia recebem a mistura gasosa pré-selecionada através de um cilindro ou gerador de **altitude simulada**. Diferente de outros modos de treinamento, a máscara não necessita de infraestrutura para sua utilização, o que torna menos oneroso o custo de construção, instalação e manutenção.

Para o treinamento dos alunos da Faculdade de Ciências Aeronáuticas da PUCRS, o Centro de Microgravidade (MicroG) desenvolveu este sistema, que é composto por uma máscara de oxigênio, traqueia de silicone, válvula seletora manual, balão de látex, um cilindro de O<sub>2</sub> medicinal a 100%, para uso em emergências, e cilindros de misturas gasosa (balanceamento de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>) (Figura 4).

**Figura 4** – Máscara de hipóxia do MicroG.



Fonte: Os autores.

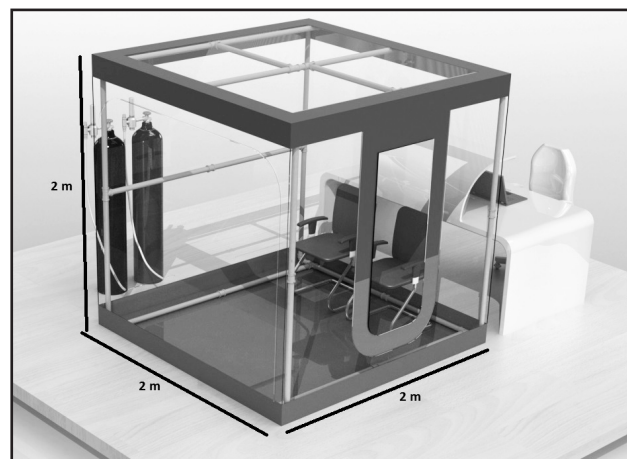
## 3.3 Desenvolvimento da Câmara de Hipóxia Normobárica

A CHN desenvolvida no Centro de Microgravidade tem como objetivo final o treinamento fisiológico de pilotos e tripulação em hipóxia e estudos do comportamento do organismo a altas altitudes, por meio de protocolos de pesquisa. Com base nesse objetivo, foi constatado que a

CHN deveria possuir as seguintes características: material que permita que ela seja desmontável, de fácil transporte e o mais leve possível, sendo a sua massa não superior a 150 kg. A CHN ainda deveria possuir dimensões suficientes para permitir sua utilização por dois voluntários e também comportar esteira ergométrica, bicicleta ergométrica ou cicloergômetro com dimensões máximas de 1,12 m por 0,53 m, por 1,13 m. O material da estrutura deveria ser impermeável.

A partir desses pré-requisitos, foi definido que a CHN teria dimensões mínimas de altura, largura e profundidade de 2 m, bem como estrutura leve e transparente. Foi desenvolvido um desenho computacional por meio do *software* CAD (Figura 5). Para o desenvolvimento da CHN e seu controle, foi necessária a elaboração de plataformas de *hardware*, *software* e *firmware* dedicados. Ao final, cada uma das partes foi integrada ao sistema de controle.

**Figura 5** – Desenho computacional da Câmara de Hipóxia Normobárica do MicroG.



Fonte: Os autores.

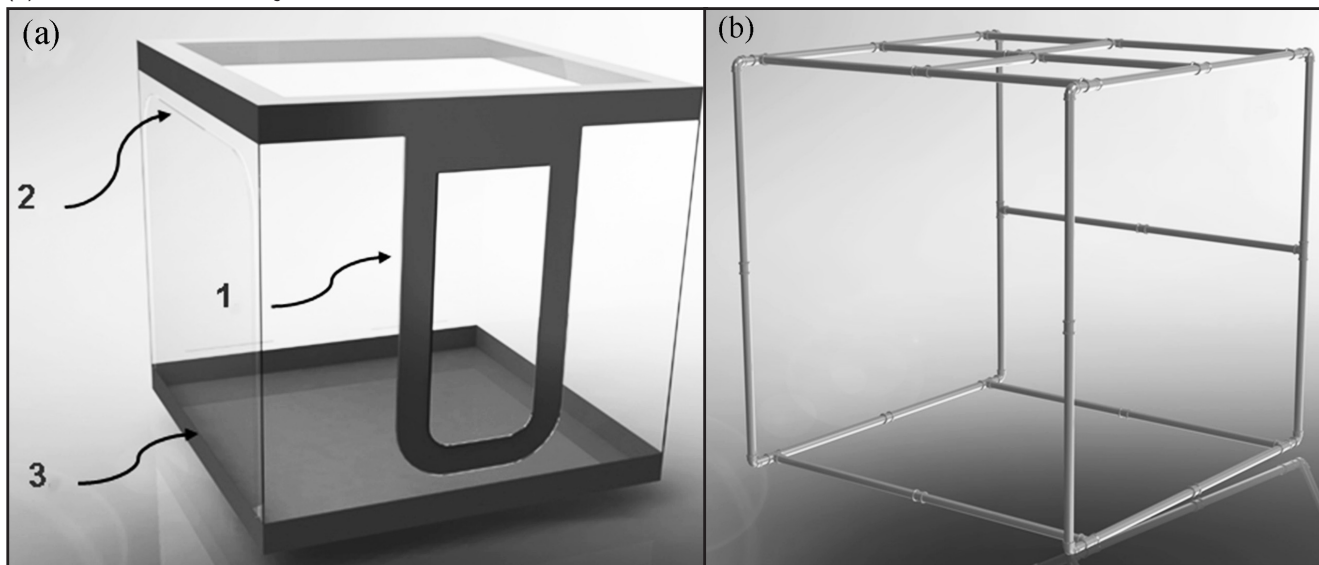
### 3.3.1 Design da estrutura principal

A CHN foi então desenvolvida com estrutura de tubos de PVC de 40 mm de diâmetro e revestida com lona vinílica. A maior vantagem desse material é possibilitar sua montagem e desmontagem em poucos minutos, além de ser leve e apresentar um excelente custo-benefício. O peso da estrutura feita de tubos de PVC é de cerca de 15 kg. Na Figura 6 (b), pode ser conferida a estrutura interna para sustentação da CHN.

Na composição do revestimento da base foi utilizada lona vinílica kp1400; nas paredes, lona vinílica kp1000; e o **laminado cristal 60** para as partes transparentes, todos contendo 0,6 mm de espessura e densidade de 0,2 g/cm<sup>3</sup>. A dimensão total do revestimento é de 24 m<sup>2</sup> e sua massa é de 48 kg, conforme Figura 6 (a).



**Figura 6** – (a) Visão esquemática frontal do revestimento da CHN. 1: Entrada Principal; 2: Entrada Secundária; e 3: Zíper. (b) Estrutura de sustentação interna simulada em *software*.



Fonte: Os autores.

A entrada principal foi desenvolvida em forma de U, com largura de 0,8 m e altura de 1,6 m, lacrada com zíper, tendo como objetivo permitir uma rápida abertura em caso de emergência. Para a inserção de equipamentos e objetos da CHN, como macas, cadeiras e equipamentos médicos, foi desenvolvida uma porta secundária, medindo aproximadamente 1,87 m de altura por 1,62 m de largura.

Para que houvesse a possibilidade de visualização do indivíduo pelo lado externo da câmara, as paredes foram projetadas com PVC transparente (laminado cristal 60), exceto nas áreas de reforço que estão em contato com os tubos. Para esses locais foi projetada a utilização de PVC opaco (lona vinílica kp1000), visto que há maior resistência. Com a intenção de haver melhor iluminação no interior, o teto também foi projetado com PVC transparente.

A entrada e saída dos tubos de gases e a fiação elétrica foram projetadas para serem inseridas na câmara por meio de duas aberturas por zíper na parte traseira, medindo 0,4 m. Para facilitar a montagem da estrutura, foi colocado um zíper na parte inferior do revestimento, possibilitando separar o piso das paredes.

### 3.3.2 Sensores

Para o controle da mistura de gás no interior da CHN, foram utilizados um sensor de  $O_2$  e um sensor de  $CO_2$ . O sensor de oxigênio é do modelo PSR-11-915-2 da *Analytical Industries*. A saída varia entre 23  $\mu A$

a 30  $\mu A$  e equivalente a escala de 0% a 100% de  $O_2$ . A resposta é menor que 20 segundos para chegar a 90% do valor medido e sua expectativa de vida é de 60 meses.

O sensor de  $CO_2$  utilizado é do modelo MG811 da *Parallax*. O sensor funciona pelos princípios eletrolíticos, em que o gás ativa o elemento de aquecimento interno, gerando uma pequena tensão na saída, na mesma proporção da quantidade de gás exposto ao ar. Esse sensor necessita de uma tensão que pode variar entre 6,5 V a 12,0 V.

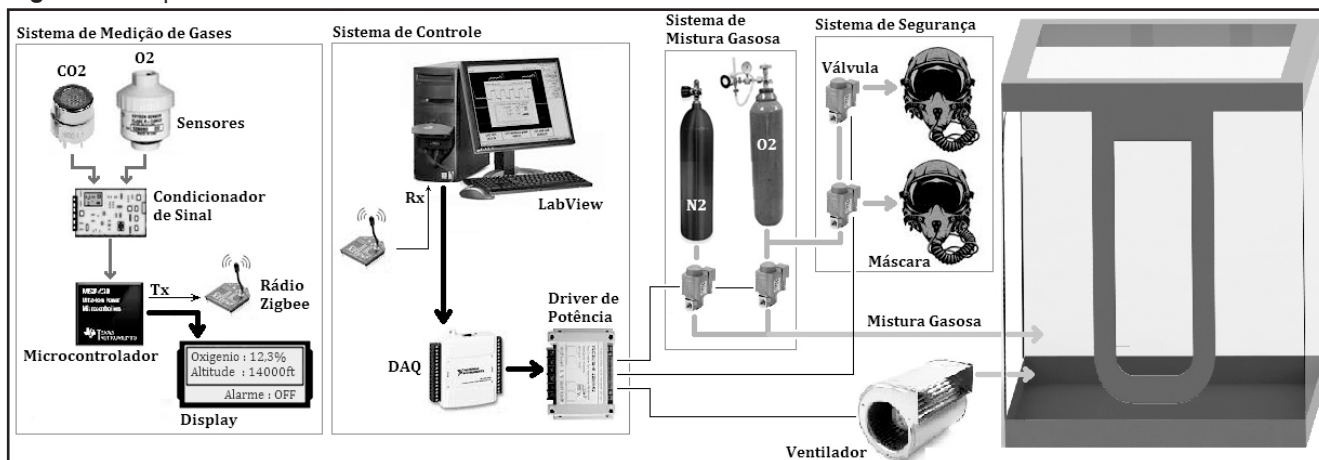
### 3.3.3 Hardware da CHN

O *hardware* da CHN é composto de duas partes: uma responsável pela leitura dos sensores de gases e comunicação, e outra pelo controle das válvulas e do ventilador de homogeneização do ar e, portanto, da concentração de  $O_2$ , conforme ilustra a Figura 7.

Para o controle automático de abertura e fechamento dos gases, foi utilizada uma válvula solenoide VSMA-1422 com duas vias. O sistema de medição dos gases é composto por um sensor de oxigênio modelo PSR-11-915-2, por um sensor de  $CO_2$  modelo MG811 e por uma placa utilizando microcontrolador de 16 bits, da família MSP430 da *Texas Instruments*, dedicado para a instrumentação e leitura desses sensores. Essa placa também é responsável por transmitir os dados dos sensores, por meio de rádio *Zigbee*, a um computador, onde é executado o *software* de controle desenvolvido na plataforma *LabView*.



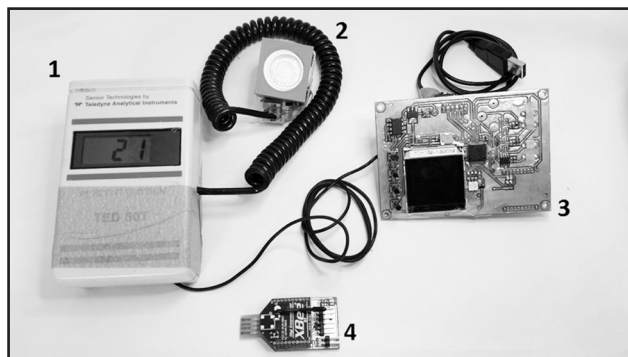
Figura 7 – Esquema do hardware da CHN.



Fonte: Os autores.

Essa placa eletrônica foi projetada em *software* CAD (*Altium Designer*) e usinada com uma fresadora CNC LPKF S63 em duas camadas. Para a interface com o usuário, foi adicionado um teclado contendo quatro botões, um display gráfico e um *buzzer* para sinalização de alertas (Figura 8). Um oxímetro portátil modelo TED 60T foi utilizado para verificar o sistema de medição de gases.

Figura 8 – Hardware. 1: Oxímetro Portátil; 2: Sensor de Oxigênio; 3: Placa eletrônica desenvolvida; e 4: Módulo Zigbee.



Fonte: Os autores.

O acionamento elétrico das válvulas de controle dos gases e do ventilador de homogeneização do ar é feito com a utilização de uma placa DAQ da *National Instruments* modelo USB-2006, conectada a um computador que processa as informações dos sensores de modo a obter a proporção de  $O_2$  e  $N_2$  desejada. O módulo DAQ está conectado a um *driver* ULN2003, que permite o acionamento de nove relés. Para acomodação da placa de circuito impresso, foi utilizada uma caixa plástica, sendo a tampa frontal substituída por uma projetada no *software SolidWorks* e impressa na impressora *3D MakerBot 2X*, na qual foram inseridos *bornes* para a conexão elétrica.

Para garantir a homogeneização da mistura gasosa, foi utilizado um ventilador (009-B40-22”, fabricante SPAL). Durante e após o uso da CHN, há necessidade da exaustão da mistura gasosa para um ambiente externo, então foi adaptado um ventilador modelo MC-11B, da *Elgin*, juntamente com uma base (suporte do conector), conector e tubos flexíveis. Para adaptá-los ao sistema, foi necessária a impressão de algumas peças na impressora *3D Makerbot 2X*, em material ABS. Por segurança, foram disponibilizadas, no interior da câmara, máscaras com 100% de oxigênio medicinal. A máscara utilizada no sistema de oxigenação é do tipo MBU-12/P, da *GENTEX*, cedido pela FAB para este projeto.

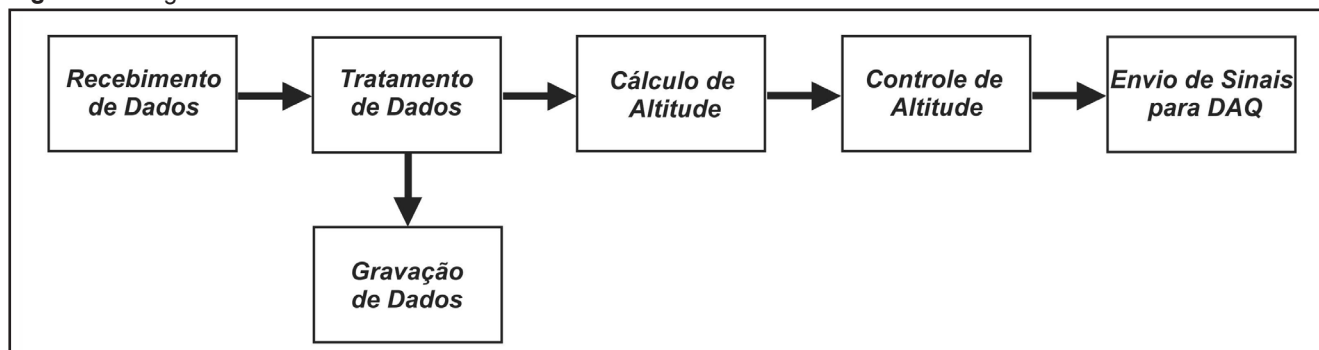
### 3.3.4 Firmware da CHN

O *firmware* foi desenvolvido em linguagem de programação C, sendo utilizada a plataforma de desenvolvimento *Eclipse* para a programação do processador MSP430F2619. Para o *firmware* ficar mais robusto, ou seja, à prova de falhas no envio de pacotes para o *software*, foi implantado o modo de transmissão *handshake*.

### 3.3.5 Software da CHN

Foi desenvolvido *software* na plataforma de desenvolvimento *LabView*, tendo como principal função controlar todos os sistemas envolvidos no projeto e ser a *interface* do usuário (*Graphical User Interface – GUI*) com o sistema. O mesmo recebe pacotes de dados enviados pelo sistema de sensoriamento, faz o tratamento desses dados, grava em arquivo de texto, faz os cálculos e controle dos gases conforme o *set-point* de altitude e, por último, envia os sinais para o sistema de controle. A Figura 9 mostra o diagrama de blocos do *software*.

Figura 9 – Diagrama de blocos do software.



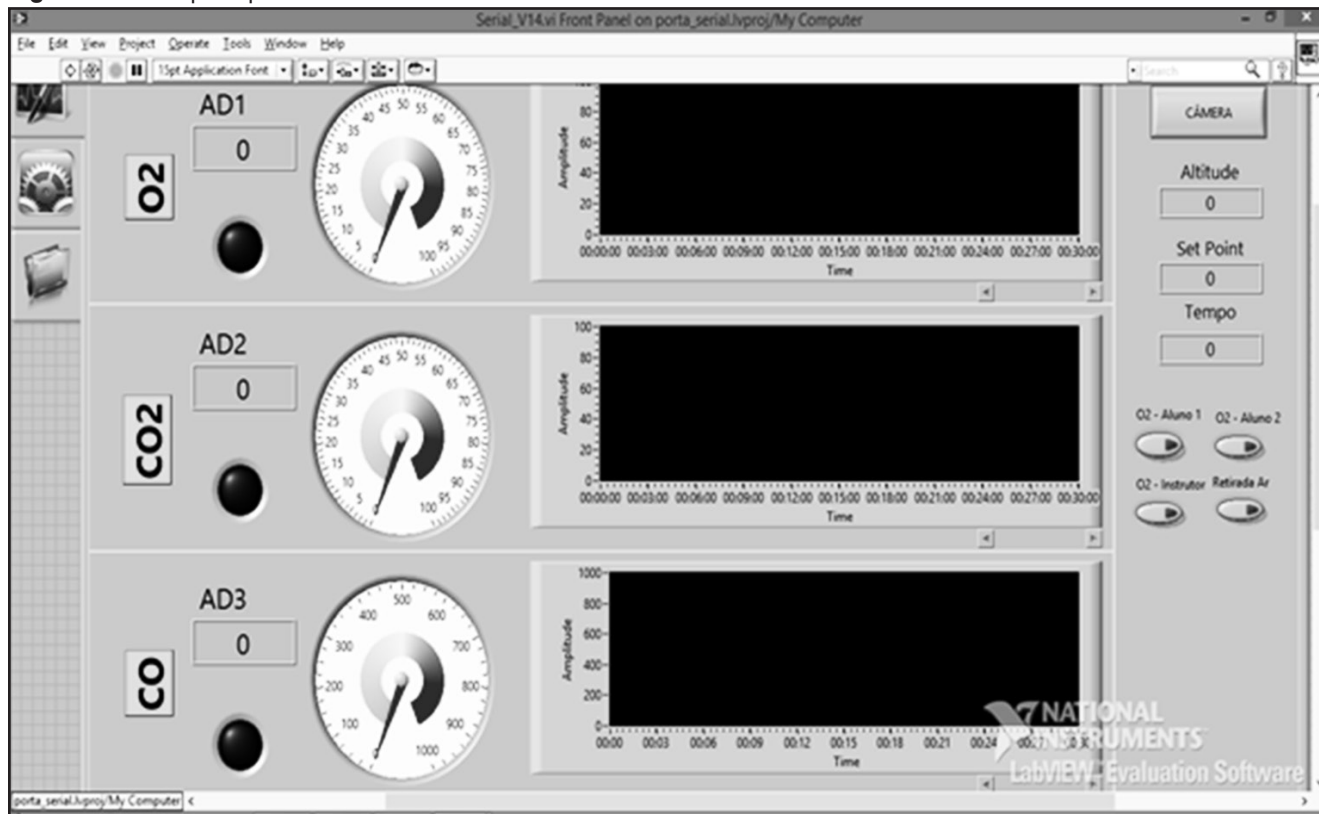
Fonte: Os autores.

O início do software se dá por meio do bloco de recebimento de dados, que então receberá os pacotes de dados enviados por uma porta serial (COM) do sistema de sensoriamento. Em seguida, é feita a verificação do pacote de dados recebidos e, ao final, o pacote de dados é alocado na variável **Valor Aceito**. Os valores de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$  podem ser gravados em um arquivo de texto, conforme necessidade do usuário.

O software foi projetado com três telas. A tela do visualizador é a principal, onde o usuário

visualiza os valores dos principais parâmetros do sistema, como  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$ , além de acionar o módulo da Webcam e as válvulas solenoide do sistema de segurança. A tela de configuração do sistema é responsável por toda a configuração do software, incluindo limites de alarmes, porta serial e endereços de gravação. A tela de entrada é responsável pela inserção de *set-points* de altitude com a possibilidade de entrada automática ou manual, além de possibilitar o acionamento de todos os equipamentos gerenciados pelo sistema de controle. Na Figura 10, está ilustrada a tela principal.

Figura 10 – Tela principal do software desenvolvido.



Fonte: Os autores.

### 3.3.6 Sistema de controle da CHN

Para determinar a mistura de gases no interior da CHN, que gera um ambiente hipóxico, de acordo com requisitos pré-estabelecidos em treinamentos ou protocolos de pesquisa, foi desenvolvido um sistema de entrega de gases controlado, realizando a integração do *software*, *hardware* e *firmware*. Além desses componentes, o sistema é composto pelos cilindros de oxigênio e de nitrogênio, válvulas solenoide e mangueiras de ar comprimido. Na Figura 11, é possível visualizar um esquema ilustrativo do sistema de controle.

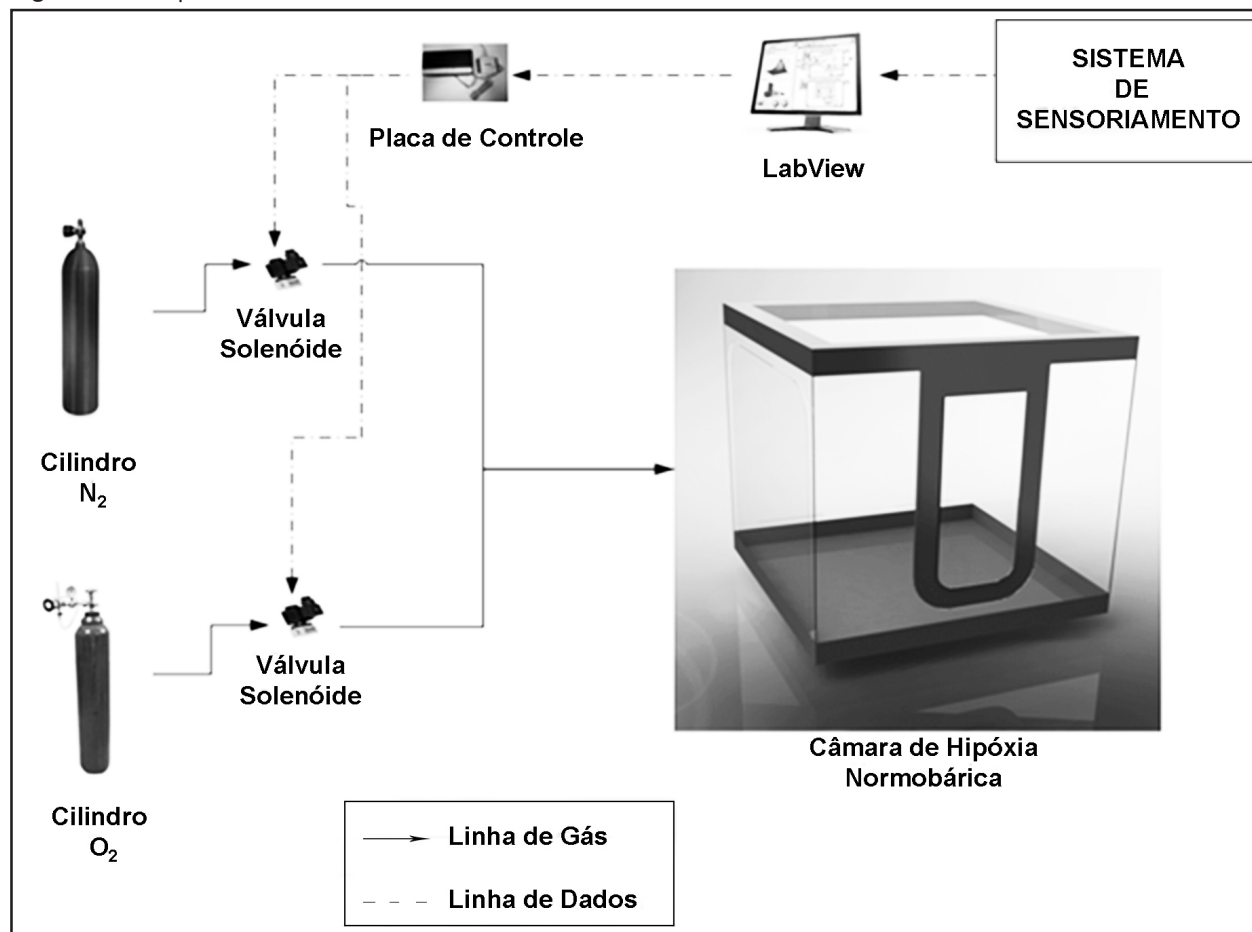
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o desenvolvimento desse projeto, foram definidas as seguintes características para a CHN: ser desmontável e de fácil transporte; possuir massa inferior a 150 kg; ter estrutura transparente; ser de material impermeável; e conter dimensões suficientes para permitir a utilização simultânea de dois voluntários, e

comportar ainda uma esteira ergométrica e (ou) uma bicicleta ergométrica e (ou) um cicloergômetro.

Para o desenvolvimento da estrutura, foram escolhidos tubos de PVC, por ser um material leve, de baixo custo em relação aos demais materiais analisados (alumínio e madeira) e por cumprir o pré-requisito de ser desmontável e de fácil transporte. O revestimento escolhido foi lona vinílica Kp1000, Kp1400 e **laminado cristal 60** por ser impermeável e permitir uma visão interna pela parte externa, cumprindo o pré-requisito de ter uma estrutura transparente e utilizar material impermeável. Com relação às dimensões, não houve mudanças em relação ao projeto inicial, ou seja, manteve-se o estipulado, as dimensões de 2 m x 2 m x 2 m, o que é adequado para treinamento de pilotos e atletas, podendo comportar a utilização simultânea de dois voluntários e um equipamento para exercícios. O peso da estrutura completa é em torno de 63 kg, sendo, assim, inferior ao pré-requisito referente ao peso máximo da mesma. Com isto, foi comprovado que a concepção e o *design* da CHN seguiram com êxito os pré-requisitos estabelecidos no início do projeto.

Figura 11 – Esquema ilustrativo do sistema de controle.



Fonte: Os autores.



Para garantir a segurança e o correto funcionamento do sistema de controle de *hardware*, foram desenvolvidos um teste de vedação e um teste de controle de *hardware*, descritos a seguir. O teste de vedação (Figura 12) foi compreendido na aplicação de fumaça branca no interior da câmara, tendo como resultado a verificação visual de vazamentos, considerados mínimos, localizados nos zíperes das aberturas, concluindo-se que a CHN é segura para uso. No entanto os indivíduos que ficam ao redor da câmara, durante protocolos de pesquisa ou treinamentos, também devem tomar precauções, como monitoramento da saturação do oxigênio no sangue, por meio de oximetria, para evitarem hipóxia indesejada. É recomendado que o recinto no qual a CHN esteja instalada seja bem ventilado, evitando levar a hipóxia a indivíduos que estejam perto do equipamento.

**Figura 12** – Teste de vedação na CHN.



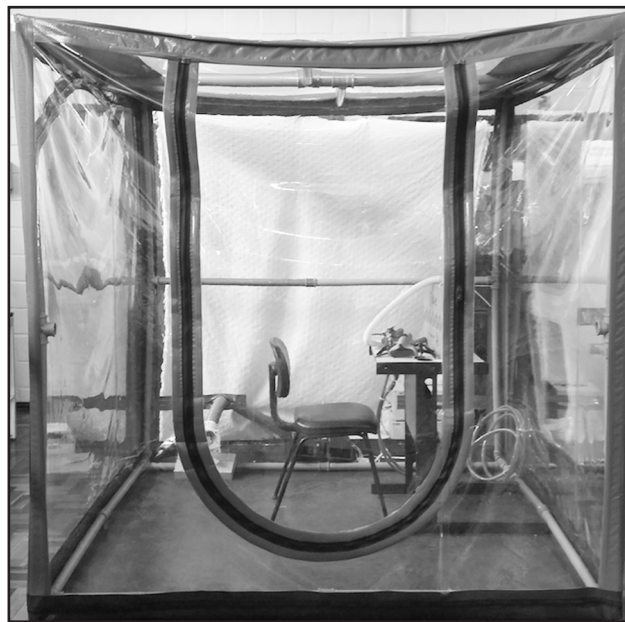
**Legenda:** Do lado direito, é possível ver a CHN completamente preenchida com fumaça branca. Do lado esquerdo, verifica-se visualmente mínimos vazamentos por meio do zíper. Tais vazamentos são compensados pelo sistema de controle.

**Fonte:** Os autores.

O teste de bancada do funcionamento de sistema de controle de *hardware*, foi realizado com o intuito de verificar o correto funcionamento e eventuais sobreaquecimentos do módulo de controle de *hardware*. O primeiro resultado demonstrou que, ao ativar ou desativar bobinas e motores, era gerado ruído, que causava problemas no módulo DAQ. Para solucionar esse problema, foram adicionados filtros na saída do módulo de controle de *hardware*. Não houve sobreaquecimento no módulo de controle de *hardware*. Uma melhoria implementada, em comparação às câmaras pesquisadas, está no aspecto de segurança. A CHN realiza um controle de CO<sub>2</sub> por meio de seus sensores embarcados e, uma vez que o nível de CO<sub>2</sub> atinge um nível crítico pré-programado, um alarme sonoro é disparado para que as ações de segurança sejam tomadas. Tais ações consistem em abertura da câmara e suplementação imediata de oxigênio para os indivíduos no seu interior.

A CHN desenvolvida apresentou um baixo custo de desenvolvimento e concepção em relação às câmaras pesquisadas. Em relação à câmara desenvolvida no *King's College London*, a CHN teve um custo de 4% da mesma. Já em relação à câmara da FAB, o custo ficou em torno de 6%, enquanto que, em relação à câmara da universidade *Embry-Riddle*, ficou em 14%. A versão final da CHN pode ser conferida na Figura 13.

**Figura 13** – Versão final da CHN.



**Fonte:** Os autores.

## 5 CONCLUSÃO

Ao final desse projeto, foi desenvolvida a estrutura física utilizando tubos e lonas vinílicas, *hardware* e *firmware*, responsável pelo sistema de medição de gases e *hardware* para o controle das válvulas e do ventilador de homogeneização do ar. Também foi desenvolvido o *software* para o controle do sistema e *interface* com o usuário e, por final, o sistema de entrega gasosa. Foi ainda desenvolvido um teste para garantir a vedação da estrutura e o perfeito funcionamento do sistema de controle de *hardware*. Conclui-se, assim, que as etapas de concepção e de *design* seguiram com êxito todos os pré-requisitos, estando a CHN apta e segura para uso.

O maior destaque deste projeto deu-se em relação ao custo, comparado com outras câmaras pesquisas, que permitem as universidades e aeroclubes adquirir a CHN e, por conseguinte, complementar a formação de pilotos e realização de novas pesquisas aeroespaciais, ao abrir um campo para diversos estudos futuros e impactar positivamente a segurança da aviação civil e militar.

A CHN também pode ser utilizada para treinamentos de atletas e em exame HAST (*Hypoxia-Altitude Simulation Test*) em pacientes com doenças respiratórias, o que amplia suas aplicações.

## REFERÊNCIAS

THE AVIATORS, terceira temporada, sexto episódio: anatomy of a commercial flight. Produção de FourOints Television, 2012.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Instituto de Aviação Civil. **Aviação Civil**: manual de curso piloto comercial – avião. Brasília – DF: Instituto de Aviação Civil, 2013a. 189 p.

\_\_\_\_\_. Instituto de Medicina Aeroespacial Brigadeiro Médico Roberto Teixeira. **Instrução na câmara hipobárica**. 2013b. Disponível em: <<http://www2.fab.mil.br/ima/index.php/imagens/event/CmaraHipobrica#2>>. Acesso em: 4 set. 2014.

CABLE, G. G. In-flight hypoxia incidents in military aircraft: causes and implications for training. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, v. 74, n. 2, p. 169-172, 2003. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/asma/ asem/2003/00000074/00000002/art00010>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

COLORADO ALTITUDE TRAINING. **Altitude simulation system for pilots: the CAT hypoxic aviation system™**. Louisville, CO: Colorado Altitude Training, 2010.

COSTA, J. C.; PROTÁSIO, K. L.; BRASILEIRO, M. E. A hipóxia é a principal alteração fisiológica

no transporte aeromédico. **Revista Eletrônica de Enfermagem do Centro de Estudos de Enfermagem e Nutrição**, v. 1, n. 1, p. 1-15, jan./jul. 2009.

DAVIS, J. R. et al. **Fundamentals of aerospace medicine**. 4th ed. [S.l.]: Ed. Wolters Kluwer, 2008. p. 30-45.

ERNSTING, J. ; GRADWELL, D. P. **Ernsting's aviation medicine**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 864 p.

HARDING, R. M. Pressure changes and hypoxia in aviation. **Medical Aspects of Harsh Environments**, v. 2, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.cs.amedd.army.mil/borden/Portlet.aspx?ID=7c0ebab2-6720-4e15-883b-dbfafa960f9>>. Acesso em: 28 jun. 2014.

HYPOXICO ALTITUDE TRAINING SYSTEMS. **Hypoxico K2 high flow system**. New York: [s.n.], 2010.

RUSSOMANO, T. **Fisiologia aeroespacial: conhecimentos essenciais para voar com segurança**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

SELF, D. A. et al. **Physiological equivalence of normobaric and hypobaric exposures of humans to 25,000 feet**: final report. Washington: Civil Aerospace Medical Institute, 2010.