

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

Development of a Normobaric Hypoxia Chamber for Studies in Human Physiology

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

Endrigo Rosa de Carvalho^I

Leandro Disiuta^{II}

Eloy Vicente De La Barra Velasquez^{III}

Júlio Cesar Marques de Lima^{IV}

Thais Russomano^V

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 O₂ y CO₂, 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.

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

I. Pontifícia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Maestría en Ingeniería Eléctrica por la PUCRS. Email: endrigorcarvalho@gmail.com

II. Pontifícia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Candidato doctoral en Ingeniería Aeroespacial por la Universidad de Tasmania (UTAS) – Australia. Email: ldisiuta@gmail.com

III. Pontifícia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Maestría en Ingeniería Eléctrica por la PUCRS. Email: eloy.velasquez@gmail.com

IV. Pontifícia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. Doctorado en Computación por la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Email: prof.julio.lima@gmail.com

V. Pontifícia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS) – Porto Alegre/RS – Brasil. PhD en Space Physiology por Kings College de Londres (KCL) - Gran Bretaña. Email: trussomano@hotmail.com

Recibido: 23/08/2016

Aceptado: 08/12/2017

leads to reduced cognitive and visual capacity, 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.

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_2 e CO_2 , 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.

1 INTRODUCCIÓN

La hipoxia, que se caracteriza por un suministro inadecuado de oxígeno (O_2) a los tejidos y células del cuerpo, es una condición con la que los pilotos pueden encontrar debido a fallos en una aeronave. Como los síntomas de hipoxia varían de individuo a individuo, es necesario que los tripulantes conozcan sus propios signos y síntomas, para permitir una posible anticipación de acciones correctivas, en caso de ocurrir esa emergencia en vuelo.

En la aviación, estadísticamente, el tipo de hipoxia con mayor número de ocurrencias es la hipóxia hipóxica, también conocida como hipoxia de altitud. Esta situación es causada por la disminución de la presión atmosférica, principalmente debido al aumento de altitud, ya que naturalmente hay una disminución en la presión parcial del oxígeno. La hipoxia de la altitud tiene como principales signos y síntomas la disminución gradual de la visión, la hiperventilación, el aumento de los latidos cardíacos, la disminución de las funciones psicomotoras, la pérdida de discernimiento, la semiconsciencia o incluso la inconsciencia y, en situaciones más graves, puede llevar al óbito (RUSSOMANO, 2012).

Aunque los accidentes de aviación debido a la hipoxia de la altitud son raros (Self et al., 2010), se pueden citar algunos casos de descompresión de la aeronave que resultaron en hipoxia, como en el accidente con el famoso golfista estadounidense *Payne Stewart*, el 25 de octubre de 1999, en Dakota del Sur (CABLE, 2003). Otro caso de similares características, se produjo el 2 de agosto de 2005, con el avión de la compañía *Chipriota Helios Airways*, que mató a 110 pasajeros y 8 tripulantes.

De acuerdo con la *Federal Aviation Administration* (FAA - Administración Federal de Aviación) y la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC), las agencias del gobierno de Estados Unidos y Brasil, respectivamente, es necesario que los cursos de formación de pilotos involucren temas relacionados con medicina aeroespacial, sin embargo sólo se

requiere el conocimiento teórico según el **MCA 58 - Manual del Curso de Piloto Comercial - Avión** desarrollado por el entonces Ministerio de Aeronáutica (BRASIL, 2013a).

El presente artículo trata del desarrollo de una Cámara de Hipoxia Normobárica (CHN) capaz de simular la hipoxia en condiciones normales de presión, a través de la oferta de una atmósfera con baja concentración de oxígeno, para quien esté dentro de la CHN, concentración esa que se puede ajustar según la altitud que se desee simular. La utilización de esta Cámara permite a los pilotos y su tripulación realizar un entrenamiento práctico para probar y conocer sus propios límites y saber identificar los síntomas en condición de hipoxia para actuar correctamente en situaciones reales de emergencia en vuelo. La CHN también permite el entrenamiento de atletas (de alto rendimiento) para un mejor acondicionamiento físico y adaptación a la altitud (situación muy común, por ejemplo, con jugadores de fútbol), además de investigaciones relacionadas con la fisiología humana y el proceso de envejecimiento.

La CHN posee características interesantes, como la posibilidad de entrenamiento simultáneo de más de un individuo, además de un sistema de control automático que permite la simulación de diferentes altitudes con la disminución de la concentración de oxígeno. Con el fin de crear una CHN con características diferenciadas en relación a las disponibles comercialmente, la estructura de la cámara está diseñada para ser ligera, fácil de montar, desmontar y transportar, pudiéndose instalarla en diversos lugares (sin necesidad de instalación especial), así como ser de bajo costo.

La construcción de la CHN tuvo por objetivo hacer más real la simulación de hipoxia actualmente realizada en el Centro de Microgravedad de la Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUCRS), la cual utiliza una Máscara de Hipoxia (para disminuir la oferta de oxígeno), pues en una situación real de emergencia en vuelo, la máscara, de forma contraria, será la fuente adecuada de oxígeno para que los tripulantes eliminen los efectos de la hipoxia de altitud. Por lo tanto, para mejorar la formación en relación con las acciones que deben ser realizadas por la tripulación, lo ideal es a utilizar hasta un entorno **real**, simulado por una cámara cerrada en la que la atmósfera tiene baja concentración de oxígeno y en el cual los simuladores de vuelo pueden adaptarse y otros experimentos para evaluar la concentración y alteraciones del proceso cognitivo de la tripulación.

En la literatura científica, es posible encontrar diversos estudios sobre la hipoxia de la altitud, en los que se describen los signos y síntomas que ocurren en los seres humanos sometidos a una atmósfera con baja concentración de oxígeno. En estos trabajos, siempre se enfatiza el hecho de que cada individuo tiene una reacción diferente cuando se somete a la hipoxia hipóxica (THE AVIATORS ..., 2012), lo que justifica la necesidad de un entrenamiento fisiológico práctico para el reconocimiento de los efectos individuales y los peligros que los mismos pueden acarrear para la seguridad de vuelo.

2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una Cámara de Hipoxia Normobárica en el Centro de Microgravedad - MicroG, de la PUCRS. En el trabajo se aborda acerca del concepto, diseño, los componentes mecánicos y estructurales, incluyendo la forma en que se genera la mezcla de aire con baja concentración de oxígeno a los usuarios, los instrumentos utilizados y *software* adaptado para su control y mecanismos de seguridad.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la CHN se realizó una revisión de la literatura, donde se abordan los aspectos más relevantes relativos a la hipoxia en la aviación, así como los diferentes métodos de simulación de hipoxia y los equipos existentes.

3.1 Hipoxia

El oxígeno es la principal fuente de vida para el ser humano, responsable de suministrar energía a las células y tejidos. La disminución de un adecuado suministro de oxígeno a las células y tejidos, causada por diferentes factores, se denomina hipoxia. El ser humano expuesto a esta situación puede tener un severo deterioro de los sistemas corpóreos, principalmente células del sistema nervioso central (especialmente células del cerebro), ocasionando síntomas como reducción de las funciones visuales, alteraciones psicomotoras y cognitivas y, en casos extremos, pérdida de la conciencia y la muerte (DAVIS et al., 2008; ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

El tipo de hipoxia que más afecta a los aeronautas es conocido como hipoxia hipobárica o hipóxica, siendo ésta resultante de cualquier ocurrencia ambiental. En esto, hay una disminución en la presión parcial arterial de O_2 (PA_{O_2}), causando una reducción en la difusión de oxígeno

a través de la membrana alveolar pulmonar, lo que resulta en la disminución de la cantidad de gas disponible para la oxigenación de los tejidos y las células. Este tipo de hipoxia puede ocurrir de forma aguda, cuando hay una exposición inmediata a un ambiente presórico menor, en la cual no hay tiempo hábil para el organismo compensar los efectos de la hipoxia (por ejemplo, descompresión en vuelo), o aún de forma crónica, donde hay una exposición progresiva, en la que existe un período de compensación del organismo. (por ejemplo, una escalada en montaña) (COSTA; PROTÁSIO, BRASILEIRO, 2009; ERNSTING, GRADWELL, 2006; HARDING, 2012).

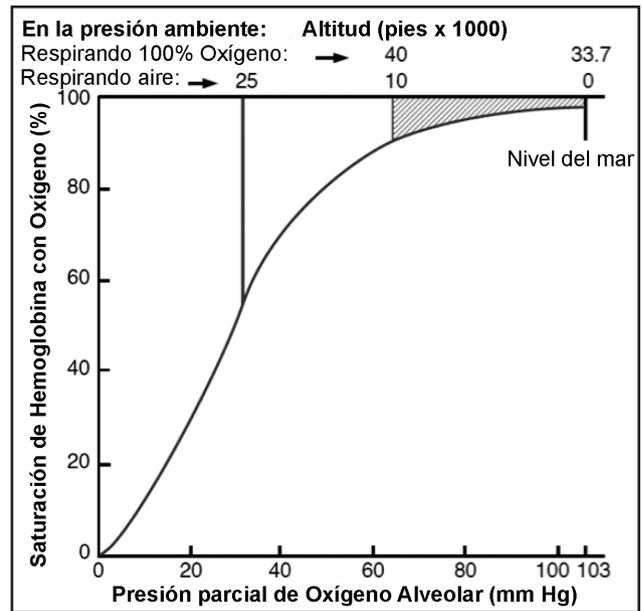
Con el aumento de la altitud, hay una disminución en la presión barométrica (Pb) y, consecuentemente, en la presión parcial de los gases atmosféricos. La caída en la presión parcial del oxígeno inspirado (PIO₂) causa una reducción en la presión parcial de oxígeno alveolar (PAO₂). La diferencia entre el PIO₂ y PAO₂ se muestra en la Ecuación 1 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

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

Donde FIO₂ es la fracción de oxígeno inspirado y R la tasa de respiración. PaCO₂ se produce por la tasa de producción de CO₂ en la ventilación alveolar. Esta tasa se mantendrá constante hasta 10.000 pies. Por encima de eso, la PAO₂ cae a niveles que desencadenan un estímulo respiratorio a través de quimiorreceptores arteriales (hiperventilación). Se trata de una medida de protección para minimizar los efectos de la hipoxia a la caída de PaO₂ y por lo tanto la saturación de la hemoglobina, como puede verse en la Tabla 1 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012).

La curva de disociación de la hemoglobina (Figura 1) (la relación entre la curva de saturación de oxígeno - SpO₂ y PIO₂) muestra que hasta 10.000 pies un gran incremento en la altura provoca una pequeña variación en SpO₂ y de 10.000 pies, un pequeño aumento en la altitud produce una gran disminución de la SpO₂ y el empeoramiento de los síntomas de la hipoxia (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

Figura 1 – Curva de disociación de la hemoglobina.



Fuente: Adaptado de Harding (2012).

Los síntomas de la hipoxia hipobárica se dividen en cuatro etapas. La **etapa indiferente** pasa desde el suelo hasta 10.000 pies (o desde el suelo hasta 39.000 pies suplementadas con O₂ 100%) en la que el individuo se ajusta sin la necesidad de suplemento de oxígeno. Sin embargo, la visión se ve afectada, principalmente por la noche. En un vuelo nocturno a 5.000 pies, se pierde de 5% a 10% de la visión, ya a 1000 pies, del 15% al 25% y más de 12.000

Tabla 1 – Los valores típicos para la presión y la saturación de la hemoglobina de un sujeto sano expuesto a hipoxia.

Altitud (ft)	Concentración de O ₂ (%)	Presión barométrica (Pb) (mm Hg)	Presión parcial de O ₂ inspirado (PI _{O₂}) (mm Hg)	Presión parcial de O ₂ en la sangre arterial (PA _{O₂}) (mm Hb)	Saturación de hemoglobina (SpO ₂) (%)
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

Fuente: Ernsting y Gradwell (2006).

pies, del 25% al 30%. También se produce un aumento del metabolismo con mayor quema calórica (COSTA; PROTASIO; BRASILEIRO, 2009; RUSSOMANO, 2012).

La **etapa de compensación** ocurre de 10.000 pies a 15.000 pies (o de 39.000 pies a 42.500 pies con O_2 100%). El organismo tiende a compensar los efectos de la hipoxia por medio de respuestas respiratoria y cardiovascular, como la hiperventilación y el aumento de los latidos del corazón. Los principales síntomas son somnolencia, cambios en el juicio, incoordinación motora, pensamiento lento, sensación de **bienestar** (cierta euforia), que es el más peligroso, ya que no permite al individuo a tomar medidas mediante emergencia (COSTA; PROTASIO; BRASILEIRO, 2009, RUSSOMANO, 2012).

La **etapa de perturbado** se verifica de 15.000 pies a 20.000 pies (o de 42.500 pies a 45.000 pies con O_2 100%). En ésta, la compensación realizada por el organismo ya no es satisfactoria. Los principales síntomas son hiperventilación acentuada, taquicardia y cefalea intensa. Hay cambios en las funciones psicomotrices, como el aumento significativo el tiempo de reacción, incoordinación muscular e incoordinación motora, cambios en las funciones cognitivas, como debilitamiento de la realización de nuevas tareas, disminución de la memoria de corto y largo plazos y razonamiento lógico, dificultad en la resolución de tareas matemáticas sencillas, pérdida de juicio e alteración en la función visual como la reducción de percepción a la intensidad luminosa. La agudeza visual se disminuye con poca luz y pérdida de visión periférica (visión en túnel) (COSTA; PROTASIO; BRASILEÑO, 2009; RUSSOMANO, 2012).

En la **etapa crítica** (acima de 20.000 pies o 45.000 pies con O_2 100%) hay un debilitamiento de los sistemas cardiopulmonar y nervioso, la acentuación de los síntomas que se producen en la etapa de perturbado. Hay una rápida disminución del desempeño mental y puede ocurrir inconsciencia con poco o ningún síntoma, convulsiones caracterizadas por contracciones musculares que producen opistótono (cabeza, brazo,

cuello y columna vertebral forman una posición de arco cóncavo hacia atrás), precedido o seguido por un o más espasmos musculares, semiconsciencia, inconsciencia e muerte (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

El intervalo entre la disminución de la demanda de oxígeno hasta el momento en que el individuo pierde la capacidad de toma de decisiones (protectoras y correctivas) se denomina Tiempo de Rendimiento Eficaz (TDE). En la práctica, el concepto más aceptado es el período en el que el individuo afectado retiene la habilidad para actuar en la corrección de situaciones difíciles (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

Un piloto que está a 15.000 pies tendrá 30 minutos o más para reconocer sus síntomas y (o) signos de hipoxia y tomar actitudes que salven a los pasajeros y tripulantes de un accidente, pero ese mismo piloto tendrá un máximo de 20 segundos, si está a 40.000 pies. El tiempo de rendimiento eficaz se muestra en la Tabla 2 (ERNSTING; GRADWELL, 2006; HARDING, 2012; RUSSOMANO, 2012).

3.2 Métodos de Simulación de Hipoxia Hipóxica

La hipoxia hipóxica puede ser generada por dos formas. La primera por el cambio en la presión ambiente, lo que provocará una disminución en la presión parcial (PIO_2) que el oxígeno ejercerá en la difusión gaseosa de los pulmones a la sangre. Este tipo de ambiente puede ser simulado en cámaras hipobáricas. La segunda forma, que será utilizada en la cámara desarrollada en ese trabajo, es obtenida por el cambio en la fracción del volumen de oxígeno en el entorno. La fracción del volumen de oxígeno es directamente proporcional a la presión parcial ejercida por él, por lo que una disminución en el volumen de oxígeno disminuirá la presión parcial ejercida en la difusión gaseosa de los alvéolos a la sangre. Este cambio ambiental puede ser simulado en cámaras normobáricas.

Tabla 2 – Relación entre TDE, altitud y la concentración de O_2 .

Altitud (ft)	Concentración de O_2 (%)	Tiempo de rendimiento eficaz TDE (s)
15,000	11,81	1800 o más
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

Fuente: Russomano (2012).

Según *International Standard Atmosphere* (ISA - atmósfera estándar internacional), los valores estándares para la presión barométrica y la concentración de oxígeno a nivel del mar son de 760 mmHg y 21%, respectivamente. En una persona sana, la saturación de la hemoglobina (SpO_2), a nivel del mar, es de aproximadamente 98% a 99% (RUSSOMANO, 2012).

3.2.1 Cámara de hipoxia normobárica (CHN)

La CHN o la tienda hipóxica consiste en una sala en la que hay una inserción de una mezcla gaseosa, generalmente nitrógeno, con presión igual a la atmosférica. Como no hay variación en la presión, su estructura puede ser construida como una carpa totalmente vedada, pudiendo tener estructura de plástico o aluminio y envoltura de nylon (COLORADO ALTITUDE TRAINING, 2010; HYPOXICO ALTITUDE TRAINING SYSTEMS, 2010).

Para este trabajo, fueron investigadas las cámaras hipóxicas desarrolladas en universidades en Inglaterra y Estados Unidos. *King's College London* tiene una cámara para investigación de la fisiología humana en ambientes extremos. Esta cámara tiene aproximadamente 9m², que se construye en plástico PVC transparente con estructura de aluminio, de aberturas selladas con cierre por cremalleras (Figura 2), e con capacidad de hasta 10 personas. La generación de aire empobrecido de oxígeno se toma a través del equipo de *eTraining With Altitude Air Generator* (TWAAG). El monitoreo de aire en el interior de la CHN se realiza por sensores de gases.

Figura 2 – CHN del *King College London* en el Reino Unido.



Fuente: Los autores.

Embry-Riddle Aeronautical University en los Estados Unidos también tiene una cámara hipóxica normobárica fabricado

por la empresa *CAT Altitude Training*. Está construida con placas de polipropileno y estructura de aluminio, siendo montada sobre una estructura de madera elevada en relación al suelo, por donde se hace el paso del cableado eléctrico. Mide aproximadamente 9,6 m² y también tiene una antesala. Tiene capacidad de utilización por 9 individuos, además de la posibilidad de uso de simulador de vuelo. La generación de mezcla gaseosa se hizo con el equipo *CAT Air Unit*. El monitoreo se hace por dos sensores de oxígeno, un sensor de dióxido de carbono, uno de presión y uno de temperatura (COLORADO ALTITUDE TRAINING, 2010).

3.2.2 Cámara de hipoxia hipobárica

La Cámara de hipoxia hipobárica (CHH) consiste en una sala, en la que hay una disminución de la presión ambiental. Su funcionamiento consiste en utilizar válvulas de vacío para reducir la presión del interior de la cámara, simulando la presión ambiental correspondiente a la altitud deseada. Su construcción, su funcionamiento y su mantenimiento implican mayor complejidad y costos en relación a las cámaras normobáricas hipóxicas, sin la posibilidad de movilidad. La Figura 3 ilustra la Cámara Hipobárica de la Fuerza Aérea Brasileña (FAB).

Figura 3 – CHH de Fuerza Aérea Brasileña.



Fuente: Brasil (2013b).

En comparación con CHH y CHN en relación con la estructura, la CHH tiene una estructura extremadamente compleja, robusta y pesada, a diferencia de la CHN, que es más ligera, pudiendo ser modulable y fácilmente transportable.

De acuerdo con Self (2010), se concluyó, después de varias pruebas fisiológicas y parámetros medidos, que la CHN es tan eficiente como la CHH para entrenamiento fisiológico en hipoxia, con la ventaja de tener mucho menor costo y ser segura, pues disminuye la posibilidad de barotrauma y de la enfermedad de la descompresión.

3.2.3 Máscara de hipoxia

Las máscaras de hipoxia reciben mezcla gaseosa preseleccionada a través de un cilindro o generador de **altitud simulada**. A diferencia de otros modos de entrenamiento, la máscara no necesita infraestructura para su uso, lo que hace menos costoso el costo de construcción, instalación y mantenimiento.

Para la formación de los estudiantes de la Facultad de Ciencias Aeronáuticas de la PUCRS el Centro de Microgravedad (MicroG) ha desarrollado este sistema, que se compone de una máscara de oxígeno, la tráquea de silicona, válvula de selección manual, un globo de látex, un cilindro de O₂ medicinal a 100% para uso de emergencia, y cilindros de mezclas de gases (O₂, y el balance de N₂) (Figura 4).

Figura 4 – Máscara de hipoxia de MicroG.



Fuente: Los autores.

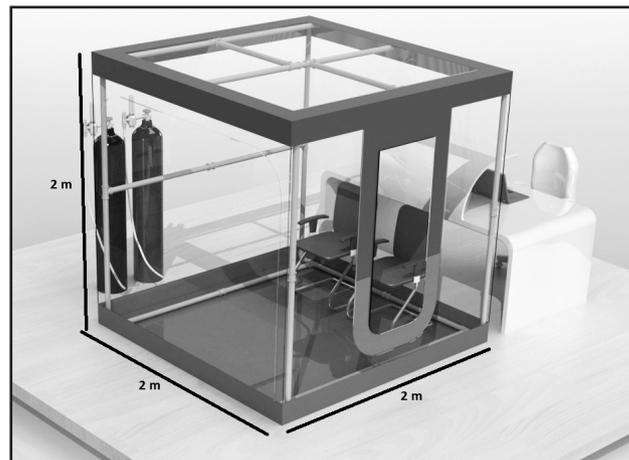
3.3 Desarrollo de la Cámara de Hipoxia Normobárica

La CHN desarrollada en el Centro de Microgravedad tiene como objetivo final el entrenamiento fisiológico de pilotos y tripulación en hipoxia y estudios del comportamiento del organismo a altas altitudes, por medio de protocolos de investigación. Con base en ese objetivo, se constató que la CHN debería poseer las

siguientes características: material que permita que sea desmontable, de fácil transporte y lo más liviano posible, siendo su masa no superior a 150 kg. La CHN todavía debería tener dimensiones suficientes para permitir su utilización por dos voluntarios y también con una cinta ergométrica, bicicleta ergométrica o cicloergómetro con dimensiones máximas de 1,12 m por 0,53 m, por 1,13 m. El material de la estructura debe ser impermeable.

A partir de estos requisitos previos, se definió que CHN tendría dimensiones mínimas de altura, anchura y profundidad de 2 m, así como una estructura ligera y transparente. Un diseño computacional se ha desarrollado utilizando el *software* CAD (Figura 5). Para el desarrollo de CHN y su control, se requiere el desarrollo de plataformas de *hardware*, *software* y *firmware* dedicados. Al final, cada una de las partes fue integrada al sistema de control.

Figura 5 – Diseño computacional de la Cámara de Hipoxia Normobárica de MicroG.



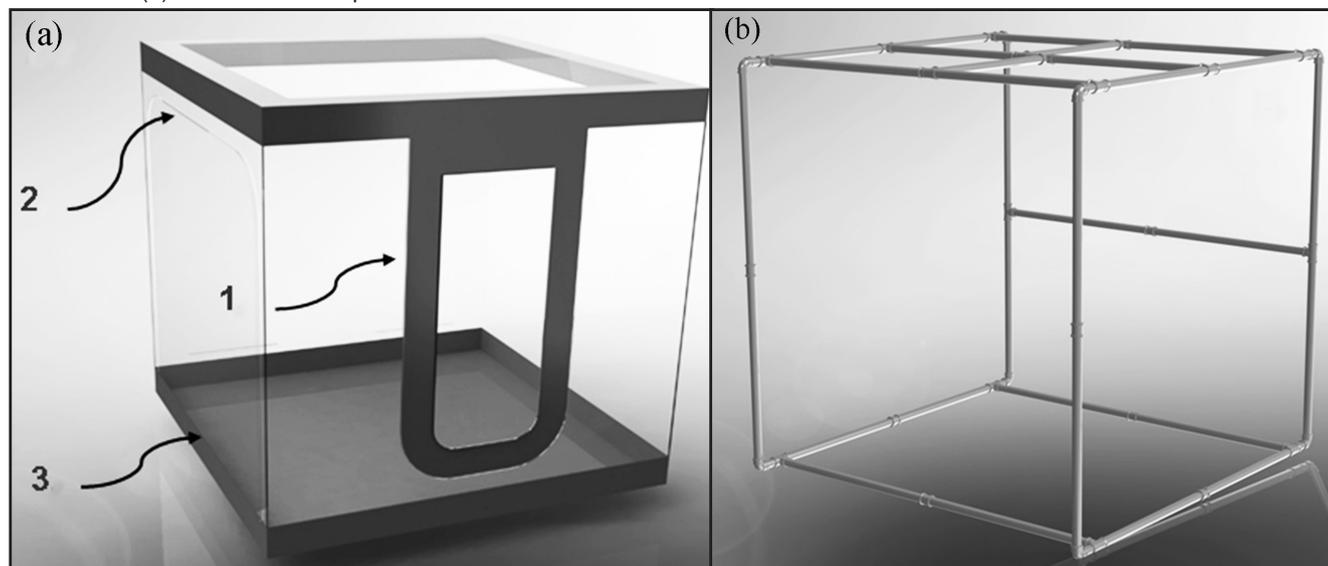
Fuente: Los autores.

3.3.1 Design de la estructura principal

La CHN fue entonces desarrollada con estructura de tubos de PVC de 40 mm de diámetro y revestida con lona vinílica. La mayor ventaja de este material es posibilitar su montaje y desmontaje en pocos minutos, además de ser ligero y presentar un excelente costo-beneficio. El peso de la estructura de tubos de PVC es de unos 15 kg. En la Figura 6 (b), se puede verificar la estructura interna para la sustentación de la CHN.

En la composición del revestimiento de la base se utilizó lona vinílica kp1400; en las paredes, lona vinílica kp1000; y el **laminado cristal 60** para las partes transparentes, cada uno tienen un espesor de 0,6 mm y la densidad de 0,2 g/cm³. La dimensión total del revestimiento es de 24 m² y su masa es de 48 kg, conforme Figura 6 (a).

Figura 6 – (a) Vista esquemática frontal del recubrimiento de la CHN. 1: Entrada Principal; 2: Entrada Secundária; y 3: Cremallera. (b) Estructura de soporte interna simulada en *software*.



Fuente: Los autores.

La entrada principal está diseñada en forma de U, con una anchura de 0,8 m y altura de 1,6 m, sellada por cremallera, con el objetivo de permitir una apertura rápida en caso de emergencia. Para la inserción de equipos y objetos de CHN, como camillas, sillas y equipamientos médicos, se desarrolló una puerta secundaria, midiendo aproximadamente 1,87 m de altura por 1,62 m de ancho.

Para que hubiera la posibilidad de visualización del individuo por el lado externo de la cámara, las paredes fueron proyectadas con PVC transparente (laminado cristal 60), excepto en las áreas de refuerzo que están en contacto con los tubos. Para estos lugares se diseñó la utilización de PVC opaco (lona vinílica kp1000), ya que hay mayor resistencia. Con la intención de haber mejor iluminación en el interior, el techo también fue proyectado con PVC transparente.

La entrada y salida de los tubos de gas y el cableado eléctrico fueron proyectadas para ser insertadas en la cámara por medio de dos aberturas por cremallera en la parte trasera, midiendo 0,4 m. Para facilitar el montaje de la estructura, se colocó una cremallera en la parte inferior del revestimiento, posibilitando separar el piso de las paredes.

3.3.2 Sensores

For the control of the gas mixture inside the NHPara controlar la mezcla de gas dentro de la CHN se utiliza un sensor de O₂ y un sensor de CO₂. El sensor de oxígeno es el modelo PSR-11-915-2 de *Analytical*

Industries. La salida puede variar entre 23 μA y 30 μA y equivalente a la escala de 0% a 100% de O₂. La respuesta es menor que 20 segundos para llegar al 90% del valor medido y su expectativa de vida es de 60 meses.

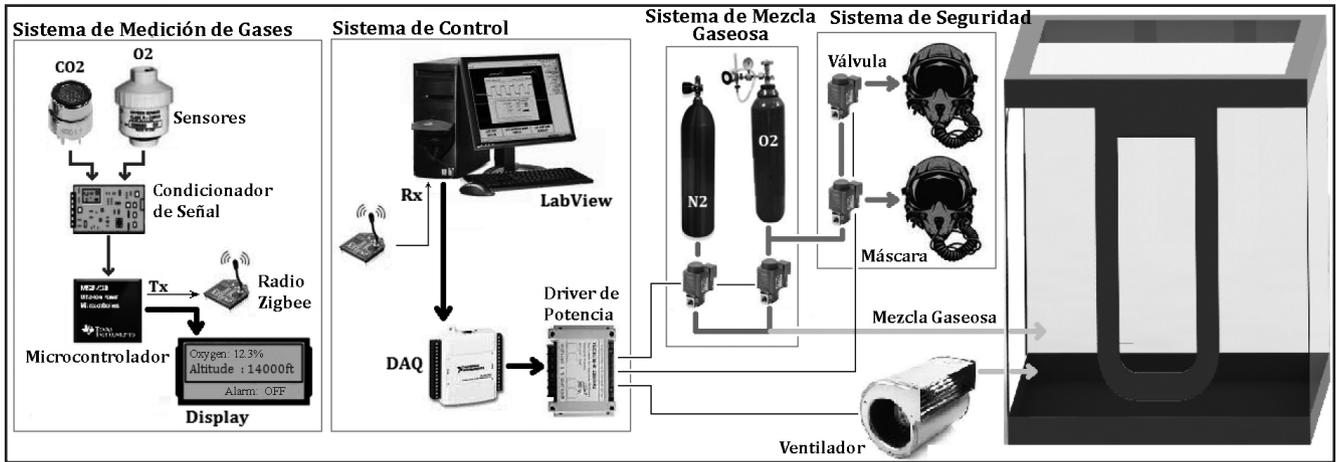
El sensor de CO₂ utilizado es el modelo MG811 de *Parallax*. El sensor funciona por los principios electroquímicos, en los que el gas activa el elemento de calentamiento interno, generando una pequeña tensión en la salida, en la misma proporción de la cantidad de gas expuesto al aire. Este sensor necesita una tensión que puede oscilar entre 6,5 V a 12,0 V.

3.3.3 Hardware de la CHN

El *hardware* de la CHN se compone de dos partes: una responsable de leer los sensores de gas y la comunicación, y la otra para el control de las válvulas y el ventilador de homogeneización de aire y por lo tanto, la concentración de O₂, como se ilustra en la Figura 7.

Para el control automático de apertura y cierre de los gases, se utilizó una válvula solenoide VSMA-1422 con dos vías. El sistema de medición de gas consiste en un sensor de oxígeno modelo PSR-11-915-2, un sensor de CO₂ modelo MG811 y una placa utilizando microcontrolador de 16 bits, de la familia MSP430 de *Texas Instruments*, dedicada a la instrumentación y lectura de estos sensores. Esta placa también es responsable de transmitir los datos de los sensores a través de radio *Zigbee*, a un ordenador, que ejecuta el software de control desarrollado en la plataforma *LabVIEW*.

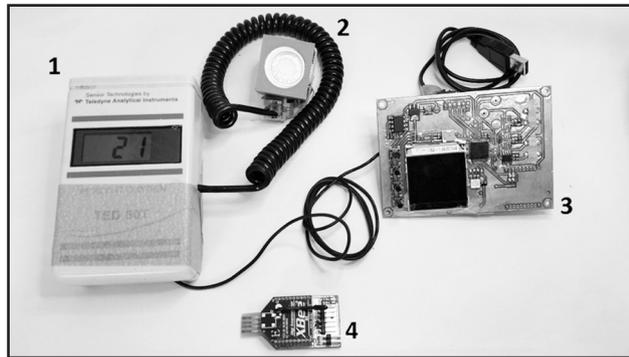
Figura 7 – Esquema del hardware de CHN.



Fuente: Los autores.

Esta placa electrónica está diseñada en *software* CAD (*Altium Designer*) y mecanizada con una fresadora CNC LPKF S63 en dos capas. Para la interfaz de usuario, se añadió un teclado que contiene cuatro botones, una pantalla gráfica y un *buzzer* de advertencia para la señalización (Figura 8). Un oxímetro portátil modelo TED 60T fue utilizado para verificar el sistema de medición de gases.

Figura 8 – Hardware. 1: Oxímetro Portátil; 2: Sensor de Oxígeno; 3: Placa electrónica desarrollada; y 4: Módulo Zigbee.



Fuente: Los autores.

El accionamiento eléctrico de las válvulas de control de gases y ventilador de homogeneización de aire se hace con el uso de una placa DAQ de *National Instruments* modelo USB-2006, conectada a un ordenador que procesa la información de los sensores con el fin de obtener la proporción deseada de O_2 y N_2 . El módulo de adquisición de datos DAQ está conectado a un *driver* ULN2003, que permite el accionamiento de nueve relés. Para el alojamiento de la placa de circuito impreso, se utilizó una carcasa de plástico, siendo la cubierta frontal reemplazada por una proyectada en *software SolidWorks* e impresa en

la impresora 3D *MakerBot 2X*, en la que se insertaron enchufes para la conexión eléctrica.

Para garantizar la homogeneización de la mezcla gaseosa, se utilizó un ventilador (009-B40-22", fabricante SPAL). Durante y después del uso de la CHN, hay necesidad de agotar la mezcla gaseosa a un entorno externo, así que fue adaptado un ventilador modelo MC-11B, de *Elgin*, en conjunto con una base (soporte del conector), conector y tubos flexibles. Para adaptarlos al sistema, fue necesario imprimir algunas partes en la impresora 3D *Makerbot 2X* de material ABS. Por seguridad, se colocaron en el interior de la cámara máscaras con 100% de oxígeno medicinal. La máscara utilizada en el sistema de oxigenación es del tipo MBU-12/P de *GENTEX*, donado por FAB para este proyecto.

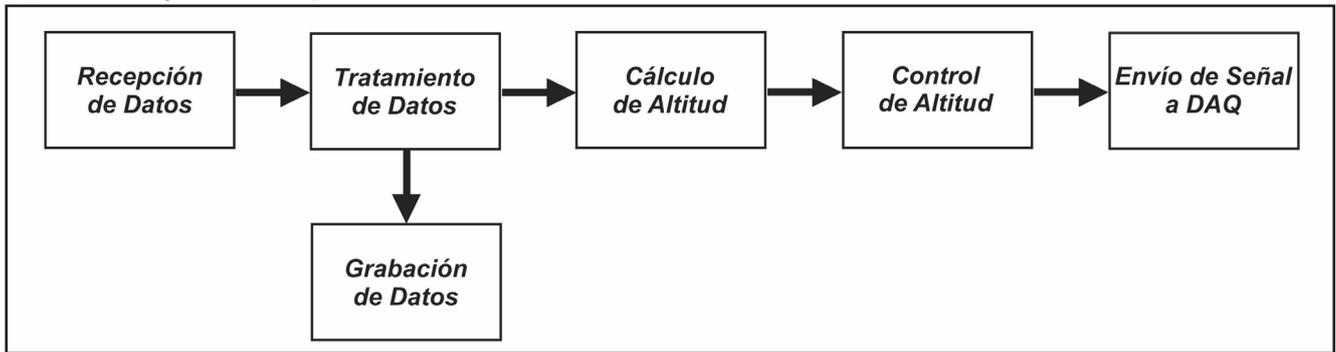
3.3.4 Firmware de CHN

El *firmware* está escrito en lenguaje de programación C, en que se utiliza la plataforma de desarrollo *Eclipse* para programar el procesador MSP430F2619. Para una mayor robustez del *firmware*, es decir, a prueba de fallos en el envío de paquetes al *software*, se implementa el modo de transmisión *handshake*.

3.3.5 Software de CHN

Fue desarrollado el *software* en la plataforma de desenvolvimiento *LabView*, con función principal de controlar todos los sistemas involucrados en el proyecto y ser la *interfaz* de usuario (*Graphical User Interface – GUI*) con el sistema. El mismo recibe paquetes de datos enviados por el sistema sensorio, hace el procesamiento de estos datos, graba en archivo de texto, hace los cálculos y control de los gases como *set-point* de altitud y, finalmente, envía señales al sistema de control. La Figura 9 muestra un diagrama de bloques del *software*.

Figura 9 – Diagrama de bloques del software.



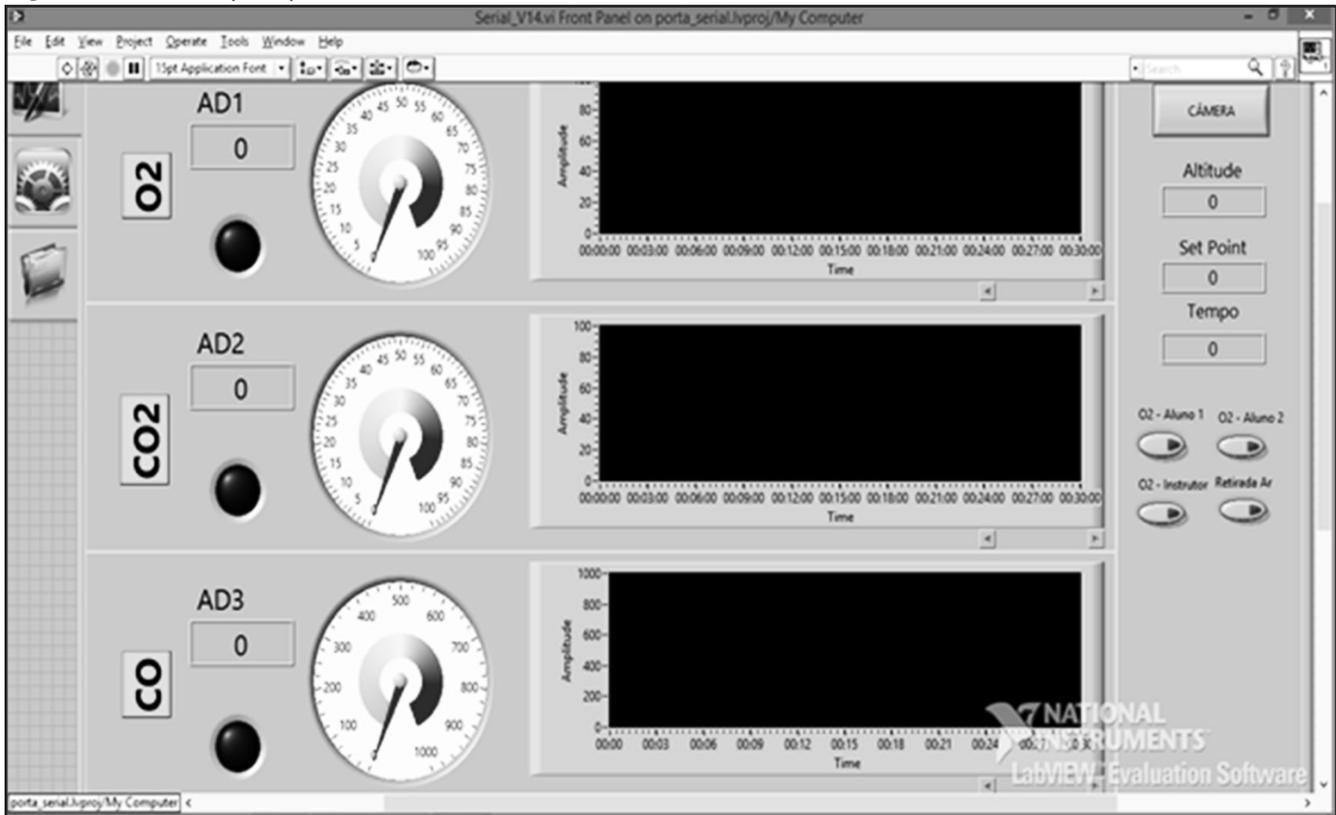
Fuente: Los autores.

El comienzo del *software* es a través del bloque de recepción de datos, que entonces recibirá los paquetes de datos enviados a través de un puerto serie (COM) del sistema de detección. A continuación, se hace la comprobación del paquete de datos recibido y, al final, el paquete de datos se le asigna en la variable **Valor Aceptado**. Los valores de **O₂**, **CO₂** y **CO** pueden grabarse en un archivo de texto, conforme necesidad del usuario.

El *software* está diseñado con tres pantallas. La pantalla del visor es la principal, donde el usuario

visualiza los valores de los parámetros clave del sistema, tales como **O₂**, **CO₂** y **CO**, además de accionar el módulo de la *Webcam* y las válvulas solenoide del sistema de seguridad. La pantalla de configuración del sistema es responsable de todo el ajuste del *software*, incluyendo los límites de alarma, puerto serie y direcciones de escritura. La pantalla de entrada es responsable de insertar los *set-points* de altitud con posibilidad de entrada automática o manual, así como posibilitar el accionamiento de todos los equipos gestionados por el sistema de control. En la Figura 10, se muestra la pantalla principal.

Figura 10 – Pantalla principal del software desarrollado.



Fuente: Los autores.

3.3.6 Sistema de control de CHN

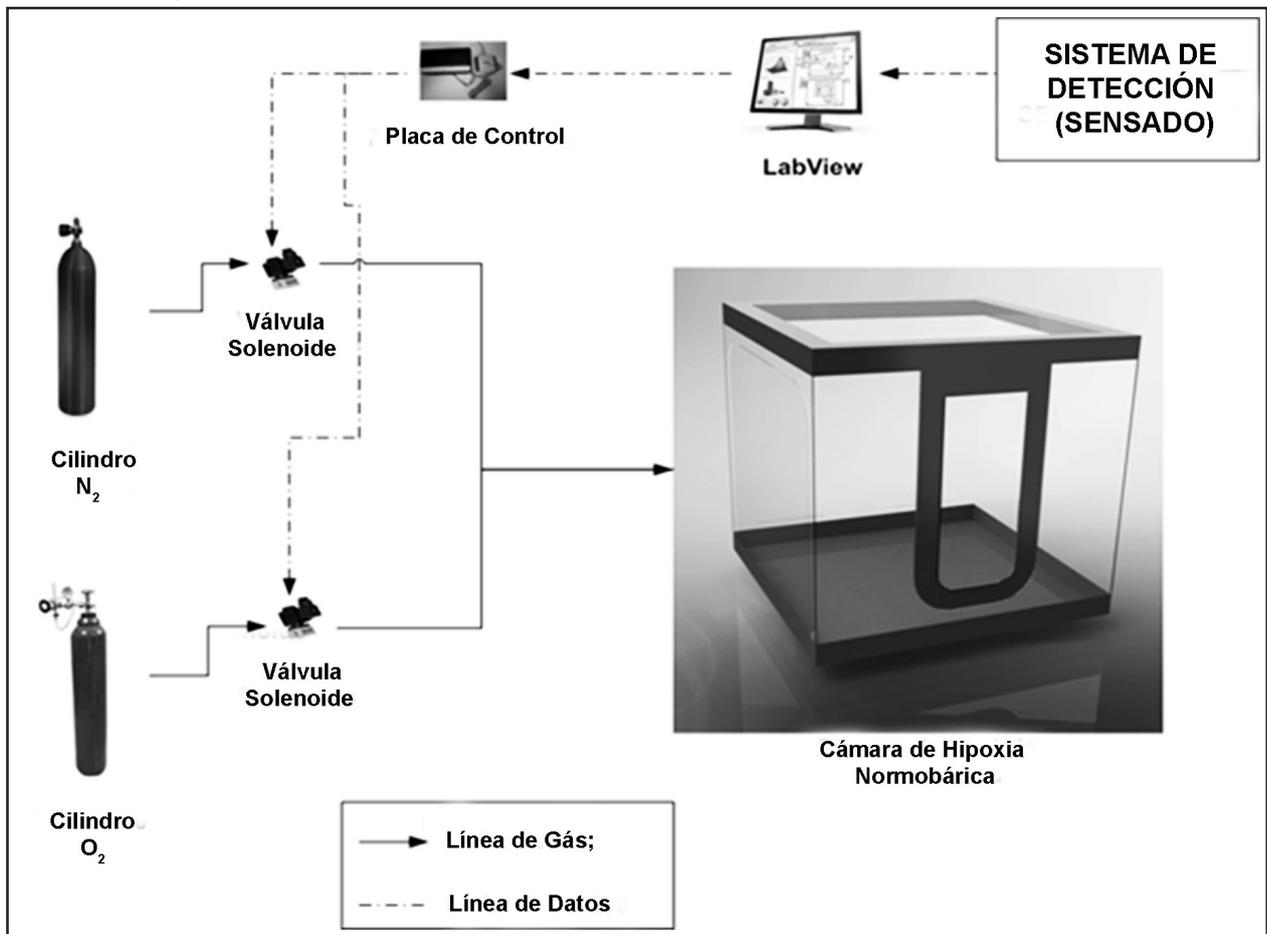
Para determinar la mezcla de gas dentro de la CHN, que genera un ambiente hipóxico, de acuerdo con requisitos pre-establecidos en entrenamientos o protocolos de investigación, se desarrolló un sistema de suministro de gas controlado, realizando la integración de *software*, *hardware* y *firmware*. Además de estos componentes, el sistema está compuesto por los cilindros de oxígeno y de nitrógeno, válvulas solenoide y mangueras de aire comprimido. En la Figura 11, es posible visualizar un esquema ilustrativo del sistema de control.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el desarrollo de este proyecto, se definieron las siguientes características para la CHN: ser desmontable y de fácil transporte; con una masa inferior a 150 kg; tener una estructura transparente; ser de material impermeable; y contener dimensiones suficientes para permitir la utilización simultánea por dos voluntarios, y contener una estera ergométrica y (o) una bicicleta ergométrica y (o) un cicloergómetro.

Para el desarrollo de la estructura, se eligieron tubos de PVC, por ser un material ligero, de bajo costo en relación a los demás materiales analizados (aluminio y madera) y por cumplir el requisito previo de ser desmontable y de fácil transporte. El recubrimiento fue elegido bolsa de vinilo Kp1000, y **laminado cristal 60** Kp1400 por lo que es resistente al agua y permite una vista interna de la parte externa, cumpliendo el requisito de tener una estructura transparente y utilizar material impermeable. En cuanto a las dimensiones, no hubo cambios en relación al proyecto inicial, o sea, se mantuvieron lo estipulado, las dimensiones de 2 m x 2 m x 2 m, lo que es adecuado para entrenamiento de pilotos y atletas, pudiendo conllevar la utilización simultánea de pilotos dos voluntarios y un equipo para ejercicios. El peso de la estructura completa es alrededor de 63 kg, estando, por lo tanto, bajo al requisito previo referente al peso máximo de la misma. Por lo tanto, se comprobó que el concepto y *design* de CHN siguieron con éxito los requisitos establecidos al comienzo del proyecto.

Figura 11 – Esquema ilustrativo del sistema de control.



Fuente: Los autores.

Para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema de control de *hardware*, se desarrollaron una prueba de sellado y una prueba de control de *hardware*, que se describe a continuación. La prueba de sellado (Figura 12) fue comprendida en la aplicación de humo blanco en el interior de la cámara, dando como resultado la verificación visual de fugas, considerados mínimos, ubicados en las cremalleras de las aberturas, concluyendo que la CHN es segura para uso. Sin embargo, los individuos que se quedan alrededor de la cámara, durante protocolos de investigación o entrenamientos, también deben tomar precauciones, como monitoreo de la saturación del oxígeno en la sangre, por medio de oximetría, para evitar hipoxia indeseada. Se recomienda que el recinto en el cual la CHN esté instalada esté bien ventilado, evitando llevar la hipoxia a individuos que estén cerca del equipo.

Figura 12 – Prueba de sellado en la CHN.



Leyenda: En el lado derecho, es posible ver la CHN completamente llena de humo blanco. En el lado izquierdo, se verifican visualmente mínimas pérdidas por medio de la cremallera. Estas pérdidas son compensadas por el sistema de control.

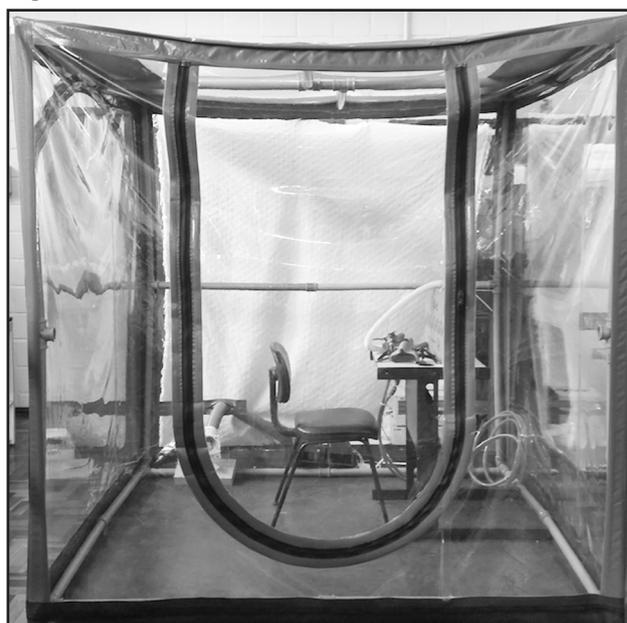
Fuente: Los autores.

La prueba de banco del funcionamiento del sistema de control de *hardware* se llevó a cabo con el fin de verificar su correcto funcionamiento y posible sobrecalentamiento del módulo de control de *hardware*. El primer resultado demostró que, al activar o desactivar bobinas y motores, se generaba ruido, que causaba problemas en el módulo DAQ. Para resolver este problema, se han añadido filtros a la salida del módulo de control de *hardware*. No hubo un sobrecalentamiento en el módulo de control de *hardware*. Una mejora implementada, en comparación con las cámaras encuestadas, está en el aspecto de seguridad. La CHN hace un control de CO₂ a través de sus sensores embarcados y, una vez que el nivel

de CO₂ alcanza un nivel crítico predeterminado, se activa una alarma audible de manera que se tomen las medidas de seguridad. Tales acciones consisten en apertura de la cámara y suplementación inmediata de oxígeno para los individuos en su interior.

La CHN desarrollada presentó un bajo costo de desarrollo y concepción en relación a las cámaras investigadas. En cuanto a la cámara desarrollada en *el Kings College London*, la CHN tenía un coste de 4% de la misma. Ya en cuanto a la cámara FAB, el costo fue de alrededor de 6%, mientras que en relación con la cámara de la universidad *Embry-Riddle*, fue del 14%. La versión final de la CHN se puede ver en la Figura 13.

Figura 13 – Versión final de la CHN.



Fuente: Los autores.

5 CONCLUSIÓN

Al final de este proyecto, se desarrolló la estructura física utilizando tubos y lonas de vinilo, *hardware* y *firmware*, responsables por el sistema de medición de gas y *hardware* para control de las válvulas y del ventilador de homogeneización de aire. También se desarrolló el *software* para control de sistemas e *interfaz* de usuario y, por fin, el sistema de suministro de gas. Aún se desarrolló una prueba para asegurar la estanqueidad de la estructura y el funcionamiento perfecto del sistema de control de *hardware*. Se concluye, por lo tanto, que las etapas del concepto y *design* han seguido con éxito todos los requisitos previos, estando la CHN apta y segura para uso.

El mayor destaque de este proyecto se dio en relación al costo, comparado con otras cámaras investigadas, que permiten a las universidades y aeroclubes adquirir la CHN y, por consiguiente, complementar la formación de pilotos y realizar nuevas investigaciones aeroespaciales, al abrir un campo para

diversos estudios futuros e impactar positivamente la seguridad de la aviación civil y militar.

La CHN también se puede utilizar para los atletas de entrenamiento y en pruebas HAST (*Hypoxia-Altitude Simulation Test*) en los pacientes con enfermedades respiratorias, lo que amplía su rango de aplicaciones.

REFERENCIAS

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/imaie/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-dbfaafa960f9>>. 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.