

# Diseño y construcción de una cámara para simular condiciones ambientales a 7000 m.s.n.m.

Tania Oviedo y Marcelo Fajardo

t\_ovigu@hotmail.com

## Resumen

Los equipos de telecomunicaciones a utilizarse en la Plataforma de Gran Altitud (PGA) están expuestos a condiciones atmosféricas propias de la altura a la cual operan. Durante su funcionamiento estos equipos tienen que soportar bajas temperaturas y bajas presiones, por lo cual dentro del Convenio Macro de Cooperación FAE-EPN es necesaria la construcción de un equipo que simule dichas condiciones en laboratorio, el mismo que permita evaluar el desempeño de los equipos de telecomunicaciones en tierra antes que estos se eleven a su lugar de operación en el PGA.

Este trabajo describe el proceso de diseño y construcción de una cámara de simulación de condiciones ambientales hasta una altura de 7000 m.s.n.m., en el mismo se analizan los parámetros de funcionamiento del equipo, así como los sistemas necesarios para conseguir simular las condiciones planteadas; buscando la mejor alternativa entre las diferentes opciones.

**Palabras claves:** Refrigeración, vacío, refrigerantes, bajas presiones, equipo de refrigeración, termodinámica, plataforma de gran altitud, PGA.

## Abstract

Telecommunications equipments to be used in the High Altitude Platform (PGA) are exposed to environmental conditions specific of their operation altitude. These equipments must resist low temperatures and low pressures when are functioning, therefore is necessary the design and construction of a chamber for simulating environmental conditions at 7000 m.a.s.l. This chamber is design to evaluate the behavior of telecommunications equipments to be use in the High Altitude Platform (PGA) before these equipments are elevated at its working place in the PGA, which is part of the Macro Institutional Cooperation Agreement FAE-EPN.

The process to design and build this chamber is described in the context of this work. Functioning parameters of the chamber are analyzed as well as the appropriate systems to simulate the operation conditions, searching the better alternative between different options.

**Keywords:** Refrigeration, vacuum, refrigerants, low pressures, refrigeration equipment, thermodynamics, high altitude platform, PGA.

## 1 Introducción

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) y la Escuela Politécnica Nacional (EPN) suscribieron un Convenio Macro de Cooperación Institucional para el desarrollo y difusión de la investigación científica y tecnológica comprometida con los procesos de desarrollo regional, nacional y local.

Este convenio FAE-EPN tiene por objeto la provisión de: Software de simulación de perfil atmosférico desde nivel de suelo hasta los 22 km de altitud sobre el nivel del mar y el sistema de captación, almacenamiento, protección y administración de energía fotovoltaica aplicados al proyecto: "Diseño y Construcción de un prototipo de plataforma de gran altitud, con fines de investiga-

ción", aprobado y financiado por la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología SENACYT.

Dentro de este proyecto se realizó la construcción de una cámara para simular condiciones ambientales de presión y temperatura a diferentes alturas hasta los 7000 m.s.n.m. Para determinar los parámetros a simular se determinan las condiciones de la atmosfera de la ciudad de Ambato, lugar donde se encuentra ubicado el proyecto PGA, mediante el envío de diferentes sondas se obtienen los datos que se pueden apreciar en la Figura 1 y Figura 2.

Según la información obtenida de ASHRAE<sup>1</sup>, la temperatura correspondiente a 7000 m.s.n.m. es  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

<sup>1</sup>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

existiendo una variación respecto a los valores medidos con las sondas, ésta variación se debe a la capacidad del aire de retener una cantidad variable de vapor de agua en relación a la temperatura del aire. A menor temperatura, menor cantidad de vapor de agua y a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua; a presión atmosférica constante.

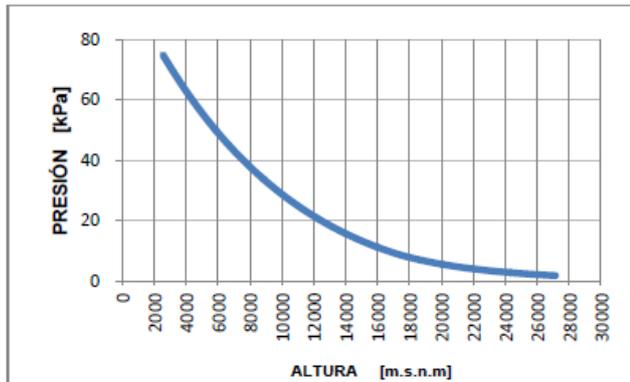


Figura 1. Variación de la presión en función de la altura.

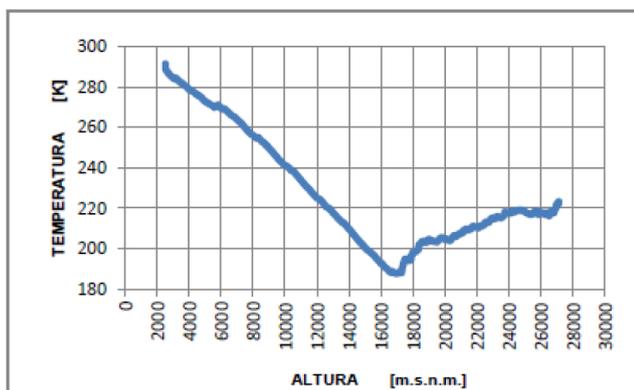


Figura 2. Variación de la temperatura en función de la altura.

Con base a estos datos se decide tomar en cuenta los valores de la Tabla 1 como parámetros de diseño.

Tabla 1. Condiciones Ambientales y de funcionamiento del equipo.

Altitud [m]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
2530	18,15	75,06
7002	-30,00	43,17

Los valores de 2530 m.s.n.m. corresponden a la ciudad de Ambato como nivel de referencia y sitio de operación del equipo; los valores a 7002 m.s.n.m. corresponden a las condiciones de diseño.

## 2 Diseño

Para el funcionamiento de la cámara es necesaria la construcción de un sistema de refrigeración que permita alcanzar  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de un sistema de vacío que permita reducir la presión según la relación:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

$$43.17[\text{kPa}] = P_{man} + 75.06[\text{kPa}]$$

$$P_{man} = -31.89[\text{kPa}] = -4.62[\text{psig}]$$

Es decir, se debe reducir 4.62 psi respecto a la presión atmosférica local de la ciudad de Ambato.

Para este efecto se determina el tipo de vacío a ser generado, calculando el recorrido libre medio ( $1.24 \times 10^{-5}[\text{m}]$ ) y la densidad molecular ( $1.3 \times 10^{19}[\text{moléculas}/\text{cm}^3]$ ) según la teoría molecular y se compara con los valores de la Tabla 2 como datos referenciales [17] concluyendo un tipo de vacío bajo.

Tabla 2. Características de bajo vacío.

Tipo de vacío	Recorrido Libre Medio	Número de moléculas por $\text{cm}^3$
BAJO	$\sim 10^{-5} - 10^{-1}$	$\sim 10^{19} - 10^{15}$

Determinado el tipo de vacío se decide emplear un sistema simple compuesto de una línea o conducto de succión que conecta la cámara de vacío con la bomba encargada de generar este como se aprecia en la Figura 3.

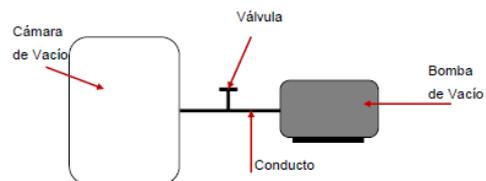


Figura 3. Esquema del sistema vacío.

Para la forma de la cámara de simulación se consideran dos opciones:

- Un cilindro hermético enfriado interiormente empleando evaporadores de placas alrededor de su pared interior y aislado térmicamente (Figura 4).
- Un recipiente paralelepípedo rectangular con un aislamiento térmico adecuado; en el cual se colocara los sistemas de refrigeración y vacío (Figura 5).

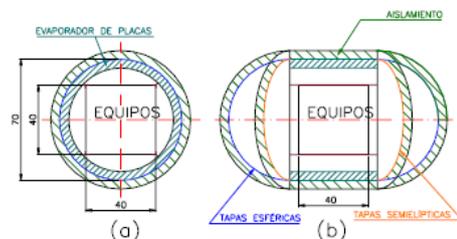
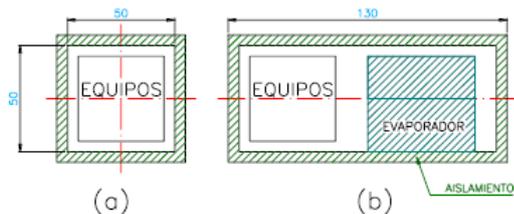


Figura 4. Vista frontal (a) y vista lateral (b) de la cámara de vacío cilíndrica.



**Figura 5.** Vista frontal (a) y vista lateral (b) de la cámara de vacío paralelepípeda.

Debido a las complejidades que presenta la construcción de la cámara cilíndrica, tanto en el sistema estructural (la hermeticidad es un parámetro muy importante en el equipo por lo que el proceso constructivo debe ser cuidadosamente realizado además de asegurar un cierre hermético en la tapa que corresponda a la puerta de la cámara), como en el sistema de refrigeración (no se dispone de evaporadores de placas en el mercado local por lo que sería necesario importarlos o construirlos) se concluye la practicidad de basarse en un equipo ya construido y que disponga del aislamiento térmico adecuado.

De las empresas existentes en el país se solicitó la colaboración de INDURAMA S.A. la cual informó la posibilidad de donar un equipo nuevo, sin realizar las perforaciones del proceso de construcción de sus productos, lo cual nos brinda la posibilidad de tener un equipo hermético en el cual se pueden montar los equipos del sistema de vacío necesarios para la construcción de la cámara de simulación.

Se opta por un refrigerador, el mismo que se puede apreciar en la Figura 6. Una vez realizada la selección de la cámara se procede a realizar el cálculo estructural y la verificación del aislamiento térmico, con estos cálculos se calcula la ganancia de calor por cada una de las paredes y se obtienen los valores indicados en la Tabla 3.



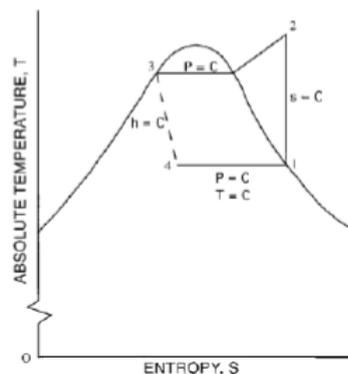
**Figura 6.** Ganancia de calor por las paredes de la cámara.

**Tabla 3.** Ganancia de calor por las paredes de la cámara.

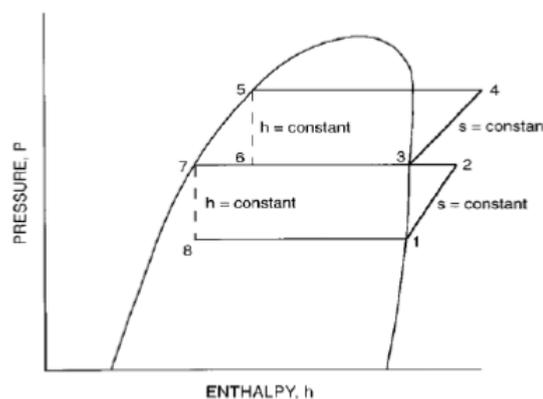
Pared	Q[W]
Vertical(62×132)	16.51
Vertical(69×62)	8.63
Tapa	19.46
Piso	11.62

Para el ciclo de refrigeración se consideran un ciclo simple de compresión de vapor (Figura 7) y un ciclo ti-

po cascada (Figura 8) y diferentes refrigerantes como se indica a continuación:



**Figura 7.** Diagrama T-s para un ciclo simple de compresión de vapor.



**Figura 8.** Diagrama P-h para un ciclo multietapa de compresión de vapor.

Se calcula para cada opción los diferentes estados termodinámicos, COP y flujo de refrigerante. Se realiza una valoración de la mejor opción y se decide optar por un ciclo simple de compresión de vapor empleando refrigerante R404 A. La carga total del sistema es igual a la suma de las cargas individuales.

$$Q_T = Q_{eq} + Q_{cambios} + Q_p$$

donde,

$Q_{eq}$  : Carga del de los equipos de telecomunicaciones (71.5 W)

$Q_{cambios}$  : Cargas por cambios de aire (0 W)

$Q_p$  : Ganancia en paredes (56.22 W)

Reemplazando estos valores tenemos que:

$$Q_T = 127.72 \text{ W}$$

Los estados termodinámicos se muestran en la Tabla 4. Con estos valores se calculan los parámetros del ciclo: flujo másico de refrigerante, potencia teórica de compresión, calor entregado por el condensador al ambiente y coeficiente de operación del ciclo.

**Tabla 4.** Propiedades Termodinámicas para un ciclo simple de compresión de vapor con refrigerante 404 A.

	Vapor Saturado ESTADO 1	Vapor Sobrecalentado ESTADO 2	Líquido Saturado ESTADO 3	Mezcla ESTADO 4
T [K]	233	309.19	300	233
P[kPa]	32.5 ( $P_{g233K}$ )	1580.013	1322.5 ( $P_{f307K}$ )	132.5
h[kJ/kg]	343.8	390.51	241.2	241.2
s[kJ/kgK]	1.6380	1.6380	1.1411	1.1951
v[m <sup>3</sup> /kg]	0.1434	0.0491	0.0010	0.069
x	1	-	0	0.48

$m_{404 A} = 1.24 \times 10^{-3}$  [kg/s] (Flujo másico de refrigerante)

$W = 58.14$  [W] (Potencia teórica de compresión)

$Q_o = 185.86$  [W] (Calor entregado por el condensador)

C.O.P = 2.2 (Coeficiente de operación del ciclo)

Conociendo estos parámetros y la carga total del sistema se procede a seleccionar los equipos necesarios para la construcción, seleccionando los que se indican en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Equipos seleccionados.

Equipo	Marca/Modelo	Capacidad
Evaporador	DELTA FRIO DFD 15 S PRE	430.81 [W]
Unidad Condensadora	TECUMSHEN CAJN2428ZBR	483.00 [W]
Válvula de expansión	DANFOSS TS2 R404A	370.00 [W]
Controles de temperatura	ARTHERMO Tsc-093	-



**Figura 9.** Estructura metálica.



**Figura 10.** Vista frontal del sistema de Refrigeración.

### 3 Construcción

Para la construcción del equipo se siguió la siguiente secuencia

- Adquisición de todos los materiales mediante procesos de compras públicas.
- Construcción de la estructura metálica para el soporte y transporte de los equipos (Figura 9)
- Instalación del Sistema de Refrigeración (Figura 10)
- Instalación del Sistema de Vacío (Figura 11)



**Figura 11.** Bomba de vacío y manómetros.

## 4 Pruebas de funcionamiento

Una vez construido el equipo se realizaron diversas pruebas con el fin de:

- Verificar el proceso constructivo
- Comprobar que se cumplan las condiciones de diseño.
- Calibrar el equipo.

Se siguen procedimientos específicos para cada sistema [1], con el apoyo de un sistema de adquisición de datos [2] se construyen las curvas que se indican en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

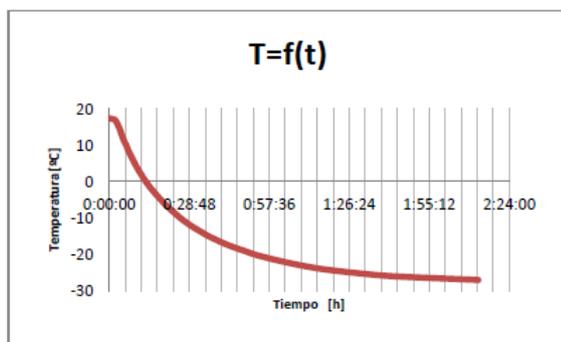


Figura 12. Curva de calibración del equipo para temperatura descendente.

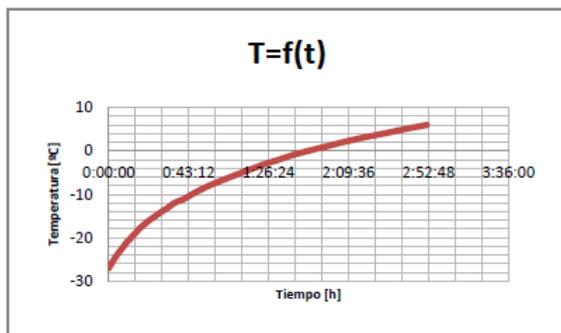


Figura 13. Curva de calibración del equipo para temperatura ascendente.

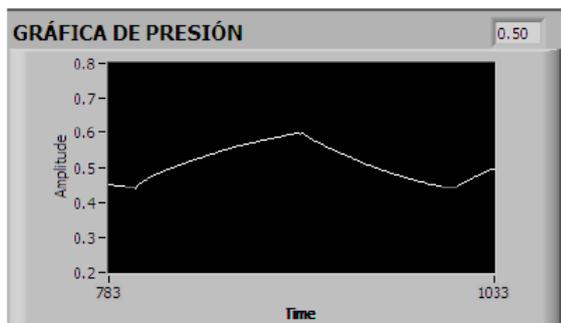


Figura 14. Curva de presión del equipo en [MPa].

## 5 Análisis de resultados

Se puede decir que las temperaturas obtenidas no corresponden al valor de temperatura mínima de la cámara, la misma que se distribuye según su correspondiente gradiente de temperatura hacia las paredes donde se realiza un promedio de cinco mediciones.

En la Figura 12 se observa que la rapidez con la cual varía la temperatura disminuye a medida que esta se acerca a su valor límite con un valor mínimo de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  en 3 horas.

El calentamiento de la cámara está limitado por las condiciones ambientales, en la Figura 8 se puede observar que el tiempo de calentamiento es mayor que el tiempo de enfriamiento.

La caída de presión a los  $-4$  [psig] en el sistema es rápida, demorando posteriormente 30 min hasta alcanzar los  $-10$  [psig], con la bomba en funcionamiento.

En la Figura 14 se puede apreciar el rango de operación del sistema de vacío controlado por el sistema diseñado en [2], con una tolerancia de  $\pm 0.1$ . Debido a las pérdidas generadas por la no hermeticidad total del sistema es indispensable que la bomba de vacío se encuentre prendida en el transcurso de las pruebas.

## 6 Conclusiones

- Fue conveniente optar por utilizar una cámara donada por INDURAMA y no construir una, porque así se pudieron minimizar las pérdidas de calor y costos.
- Es preferible adquirir una unidad condensadora ya que de esta manera se asegura un correcto funcionamiento del sistema, este tipo de unidad posee: un sistema de control al ventilador del condensador, un sistema de almacenamiento del refrigerante y preóstatos incorporados, lo cual minimiza costos, mejora el mantenimiento y monitoreo de funcionamiento.
- Al no necesitarse elevados niveles de vacío; el diseño, la selección y la construcción se facilitan, debido a que la capacidad de los equipos es mayor a los requerimientos del sistema, permitiendo que factores como; conductancia, régimen de flujo, caudal, etc., no influyan drásticamente.
- Se comprobó que debido a que la diferencia de temperaturas al mantener una presión constante es mínima, el refrigerante 404A puede ser considerado como una mezcla azeotropa.
- La correcta selección y posterior calibración de la válvula de expansión asegura que el evaporador extraiga la cantidad de calor para la que fue diseñado.

6. La capacidad de enfriamiento del equipo está íntimamente relacionada con la capacidad del refrigerante, la capacidad del compresor, y el sistema de expansión.
7. El orden de operación de los equipos influye en los parámetros de funcionamiento, debido a que la masa de aire dentro de la cámara varía, necesitando mayor tiempo para enfriamiento si se dispone de menor masa de aire.

## Referencias

- [1] Fajardo Marcelo, Oviedo Tania. *Diseño y construcción de una cámara para simular condiciones ambientales a 7000 m.s.n.m. destinada a evaluar el comportamiento de equipos de telecomunicaciones a utilizarse en la plataforma de gran altitud (PGA)*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [2] Aguilar Diego, Moncayo Marlon; 2011. *Control y Monitoreo de un Sistema Hermético a Bajas Temperaturas y Presión de Vacío*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [3] Ramírez Ricardo; 1987, *Simulación de cámaras frigoríficas usando el ciclo de refrigeración por compresión*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [4] Guzmán Fernando, Ramos Fernando; 1995. *Estudio del comportamiento del refrigerante alternativo HFC-134a en sistemas de refrigeración domésticos y comerciales*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [5] COLLAGUAZO Luis, TAIPE Nelson; 1999. *Diseño y recuperación de un equipo de refrigeración para el laboratorio de termodinámica*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [6] CABEZAS Diego, RODRÍGUEZ René; 1998. *Diseño de un sistema de refrigeración en cascada usando ciclos de refrigeración por compresión de vapor*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [7] CHICAIZA Freddy; 2003. *Montaje, operación y mantenimiento de sistemas de refrigeración*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [8] RODRÍGUEZ Hugo, SEGOVIA Patricio; 1983. *Normalización de instalaciones de gases médicos y vacío para hospitales*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [9] CEDEÑO Miguel; 2009. *Diseño sísmo-resistente de tanques de acero soldados, para almacenamiento atmosférico a baja presión de líquidos*. Tesis EPN, Quito, Ecuador.
- [10] CENGEL Yunus, BOLES Michael; 2002. *Termodinámica*. 5ta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, pp. 610-627.
- [11] DOSSAT Roy; 1978. *Principles of Refrigeration*. 2da Edición, John Wiley, New York.
- [12] ASHRAE HANDBOOK; 1998. *Refrigeration*. Ashrae, Atlanta
- [13] INCROPERA Frank, DE WITT David; 1996. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4ta Edición, Editorial Pearson Prentice Hall, pp. 74-105.
- [14] KREITH Frank, BOHN Mark; *Principios de Transferencia de Calor*. Editorial Thomson Learning, México, 2001.
- [15] ROBERTS, Richard; 1963. *Ultrahigh vacuum and its applications*. Editorial Prentice-Hall.
- [16] HOLKEBOER, David; 1967. *Vacuum engineering*. Editorial Boston Technical.
- [17] HOFFMAN Dorothy, THOMAS John y Otros; *Handbook of vacuum science and technology*. Editorial Academic Press, San Diego, 1998.
- [18] LEON Juan; *Diseño y Cálculo de recipientes a presión* 2001, Editorial Inglesa, 2001.
- [19] O'Neil, F.W.; *Compressed air data handbook of pneumatic engineering practice*. Compressed Air magazine, New York.
- [20] NOAA, NASA, USAF; 1976. *US Standard Atmosphere*. <http://scipp.ucsc.edu/outreach/balloon/atmos/1976%20Standard%20Atmosphere.htm> (Mayo 2009).
- [21] INTERNATIONAL PHYSICS OLYMPIAD; 2008. *Cambio de la temperatura del aire con la altitud, con la estabilidad atmosférica y con la contaminación del aire*. [http://www.ucm.es/info/rsef/oef/OIF2008/Theory\\_3\\_es.pdf](http://www.ucm.es/info/rsef/oef/OIF2008/Theory_3_es.pdf). (Mayo 2009)
- [22] TUOMAS Roger; 2006. *Properties of Oil and Refrigerant Mixtures*.
- [23] Dupont Suva Refrigerants. *Thermodynamics Properties of HFC 134a*. Technical Information.
- [24] Dupont Suva Refrigerants. *Thermodynamics Properties of R-404A*. Technical Information.
- [25] Catálogo general refrigeración comercial, Danfoss.