

Futuras aplicaciones de sistemas reutilizables para la investigación en la estratosfera

Future applications of reusable systems for stratospherical research

Jorge Sancho Muñoz*, Alejandro Caballero Sánchez, Miguel Ferrando-Rocher ¹

¹Stratolloon - Universitat Politècnica de València. Camino de Vera S/N, Edificio StartUPV (9B), 46022 Valencia.

*Autor para correspondencia / corresponding author: Jorge Sancho Muñoz (jsancho@stratolloon.com)

ABSTRACT

Stratospheric balloons, as a tool to support and obtain meteorological data or as a research platform have a great potential given the capabilities and advantages they present over their main competitors such as satellites or probe rockets, mainly due to their low cost and ease of use compared to their competitors. These balloons have been used for various scientific purposes since the twentieth century, and in the twenty-first century begin to postulate as an alternative to traditional high-altitude research systems and as one of the fundamental pillars within the NewSpace current, due to its multiple capabilities and uses. However, this article indicates the need to make these systems even more reusable in order to reduce the costs and environmental impact that the use of these systems can generate.

RESUMEN

Los globos estratosféricos, como herramienta de apoyo y obtención de datos meteorológicos o como plataforma de investigación tienen un gran potencial dado a las capacidades y ventajas que presentan respecto sus principales competidores como podrían ser los satélites o cohetes sonda, principalmente debido a su bajo coste y facilidad de uso en comparación con sus competidores. Esto ha hecho que los globos se hayan usado con diversos fines científicos desde el S. XX, y que en el S.XXI se comiencen a postular como una alternativa a los tradicionales sistemas de investigación de alta altitud y como uno de los pilares fundamentales dentro de la corriente NewSpace, debido a sus múltiples capacidades y usos. No obstante, en el presente artículo se indica la necesidad de hacer que estos sistemas sean aún más reutilizables si cabe para reducir costes y impacto medioambiental que pueda generar el uso de estos sistemas.

Palabras clave / Keywords

Estratosfera, globos, alta altitud, reutilización, helio, atmósfera.

Stratosphere, balloons, high altitude, reusability, helium, atmosphere.

Introducción

Típicamente, a lo largo del siglo XX, la gran mayoría de observaciones científicas y demostraciones de ingeniería espacial han sido realizadas por satélites. Con la llegada de los globos estratosféricos en los últimos años, la comunidad científica ha trasladado gran parte de sus investigaciones a la estratosfera. En

este sentido, estos globos son utilizados ampliamente para estudiar la atmósfera, su química y su dinámica. A su vez, son herramientas valiosas para los astrónomos y biólogos, así como para demostrar tecnologías innovadoras en las capas intermedias de la atmósfera.

En un amplio sentido, un globo estratosférico es una película delgada de polietileno en cuyo interior se almacena helio y, en su conjunto, permiten hacer flotar una carga útil en la estratosfera. Uno de los grandes desafíos a los que se enfrentan los globos estratosféricos es poder recuperar de manera segura y eficiente la carga útil lanzada, de tal forma que pueda ser reutilizada en subsiguientes investigaciones. Aún siendo cierto que existen obvias restricciones en el tamaño y el peso de la carga útil que pueden cargar los globos estratosféricos frente a los satélites, se han llevado a cabo múltiples experimentos desafiantes con equipos de última generación a un coste decenas de magnitudes inferior. Por este motivo, los globos científicos se han posicionado como una alternativa muy útil dentro de la ciencia espacial.

El auge de este tipo de tecnología queda patente por el interés que muestran en ella muchas de las compañías tecnológicas y agencias espaciales más importantes del mundo. Google, NASA, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), ESA e importantes empresas aeronáuticas europeas han visto la oportunidad y el potencial de expansión de dar conectividad en vastas áreas despobladas e incomunicadas. Además de este nicho de mercado con fines tecnológicos, también existen oportunidades dentro del campo educativo e incluso comercial. En esta nueva “carrera espacial” de los globos estratosféricos, destacan la iniciativa “Loon” de Google o la compañía “World View” con una inversión superior a los 80 millones de dólares. En ambos casos, son proyectos orientados a lanzar globos a 30 km de altura y que pueden permanecer en una región determinada aprovechando los modelos matemáticos que predicen los vientos estratosféricos. No obstante, las estimaciones no siempre son precisas y en no ocasiones se ha llegado a perder el control de los globos llegando a caer en áreas civiles con el consecuente riesgo para la población y coste para la empresa afectada.

Desarrollo

Antes de realizar cualquier exploración en la estratosfera, se hace completamente necesario conocer las características atmosféricas tales como la temperatura, presión, densidad, velocidad del viento y humedad debido a que las mismas varían en la práctica de un modo aparentemente aleatorio según diferentes escalas de tiempo y espacio.

Para aplicaciones aeroespaciales, la sistemática consiste en describir la estadística de estas variaciones en base a datos meteorológicos disponibles según la altitud, longitud y latitud. Estas estadísticas abarcan muchos años y son realizadas constantemente debido a la necesidad de estimar una previsión de la evolución a corto plazo de la atmósfera en la región en la que se va a volar a causa de que la meteorología es un factor relevante para la seguridad del vuelo. Es digno de mención que, a pesar de todos los avances realizados, cuando esta es desfavorable no es un asunto de importancia menor para el correcto desarrollo de la misión, debido a que se suele optar por la cancelación de la misión.

En casi todos los modelos de atmósfera tal como el “International Standard Atmosphere” (ISA), la distribución de temperaturas se especifica en términos de segmentos de variación definida y fija de la temperatura con la altitud entre determinados valores de la misma. Una vez se ha definido el valor del Gradiente de la Temperatura con la altitud $\frac{\partial T(z)}{\partial z} = \beta$ para cada segmento o capa de la atmósfera, un valor que se considera constante, se pueden deducir la presión y la densidad, mediante la suposición de que el

aire se comporta como un gas ideal y, aceptando la ecuación aerostática:

$$\frac{p}{\rho} = R_{g_{aire}} \cdot T \quad (1)$$

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz \quad (2)$$

pueden lograrse modelos analíticos cerrados, los cuales suponen una gran comodidad para el estudio y comparación del comportamiento de las aeronaves que nos llevan a modelos como el que se presenta a continuación:

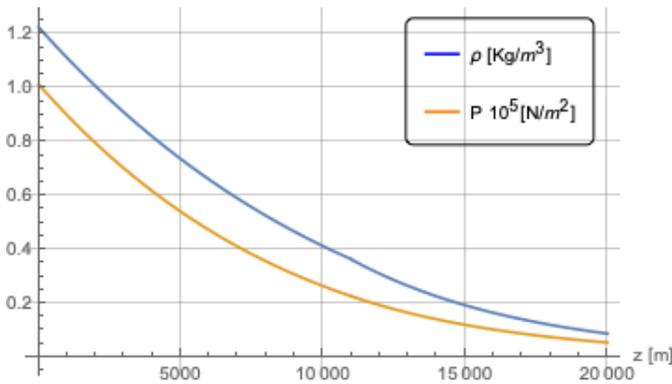


Figura 1. Evolución de la presión y densidad del aire en función de la altitud según ISA.

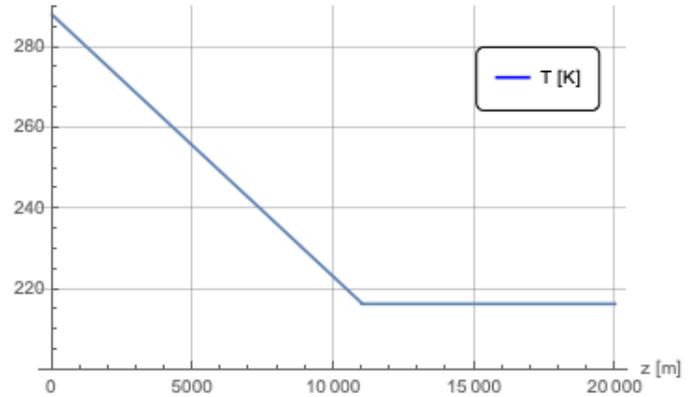


Figura 2. Evolución de la temperatura del aire en función de la altitud según ISA.

Como se puede observar en las figuras 1 y 2, cualquier dispositivo estratosférico lanzado desde la superficie terrestre se verá sometido a grandes gradientes de las tres variables básicas atmosféricas (presión, temperatura y densidad), siendo estas dos últimas las más críticas para un dispositivo que queremos situar en una cota situada entre 10 km y 20 km de altura y que regrese a la superficie en correcto estado. Esto es debido a que la temperatura será un factor a tener en cuenta a causa de la dilatación o contracción térmica de los materiales y correcto funcionamiento de los sistemas electrónicos y la densidad será un factor de vital importancia a la hora de desplegar cualquier dispositivo para reducir la velocidad de caída de nuestra carga útil y poder recuperarla de manera segura.

Es por ello que, en la actualidad, este tipo de dispositivos se pueden clasificar en dispositivos más ligeros que el aire (zepelines y globos) o más pesados que el aire (aviones de alta altitud), siendo los globos los tradicionalmente utilizados debido a su bajo coste en comparación con las otras alternativas. Así mismo, estos globos se pueden dividir en dos grandes grupos: abiertos (o de presión cero) y cerrados (o de sobrepresión), cada uno contando con diferentes duraciones máximas de vuelo y diferentes cargas de pago máximas.

Con respecto a la casuística que supone el lanzamiento de globos a la estratosfera, podemos encontrar cuatro fases bien diferenciadas:

1. Una primera fase de lanzamiento donde se pretende lograr la elevación vertical, sin daños del globo y su tren de instrumentos, hasta que este se sitúe sobre la carga útil y la eleve sin dañarla.

2. Una fase de ascenso inicial, donde la velocidad de subida promedio es del orden de 200 m/min y que abarca una de las fases más críticas del vuelo: el ingreso a la Tropopausa, situada entre los 5 y 10 km de altitud, donde se presentan las temperaturas más bajas de toda la capa atmosférica y, por lo tanto, donde el material es más quebradizo. Esta característica junto con las corrientes de chorro que se generan en esta capa, hace de la Tropopausa la zona más habitual para roturas y fallas en los globos.
3. Fase de vuelo, estadio de vuelo en el cual el globo se encuentra completamente expandido y habrá alcanzado su altura de flotación (que dependerá de diversos factores tales como la temperatura, corrientes de aire, etc.)
4. Descenso y recuperación, donde el globo generalmente es seguido por un avión o helicóptero y, tras haber seleccionado una zona poco poblada, se activa el mecanismo de separación. En este momento, la carga útil se desprende del globo y permanece en caída libre durante unos segundos hasta que se produce la apertura del paracaídas y el descenso final.

Esta última fase es, junto con la de ascenso inicial, la más crítica del vuelo debido a que el paracaídas puede sufrir algún daño y no llegar a desplegarse con normalidad, causando en muchos casos la destrucción de la carga útil del globo, el impacto en núcleos habitados y la imposibilidad de recuperarlo al haber descendido en una zona de difícil acceso o que no se ha podido delimitar. Es por ello que, actualmente, se está investigando sobre sistemas de recuperación activa como podría ser el uso de hélices en esta última fase que permita seleccionar la velocidad de descenso de la carga así como el punto de descenso exacto. Permitiendo minimizar costes al, entre otras, no ser necesario un costoso equipo de rescate que siga al globo sobre su descenso final en una suerte de “Geocatching”.

Características técnicas o requerimientos del dispositivo

Habiendo sentado las bases físicas, atmosféricas y operativas que dictarán el comportamiento del dispositivo reutilizable en las fases de ascenso, descenso y operación en la estratosfera, se hace conveniente la justificación de las condiciones de diseño y fabricación que permiten operar a dicho dispositivo.

En este sentido, se han agrupado las distintas características técnicas que definen al dispositivo en varias categorías claramente diferenciadas: adaptación al uso o al cliente, requerimientos impuestos por el entorno y características derivadas de las condiciones de vuelo.

Al contrario que un dispositivo aéreo no tripulado convencional y apto para el público general, donde se dispone de una solución rígida y apenas adaptable, la variedad de cargas que pueden elevarse a la estratosfera y los diferentes escenarios o aplicaciones para las que son diseñadas dichas cargas obligan a diseñar un dispositivo modular que permita modificar su estructura en base a la naturaleza de la carga del cliente, la fragilidad de la misma y el peso total del dispositivo. Los mayores condicionantes de la estructura modular, en la mayoría de situaciones, será el propio peso de la carga a transportar que, sumado al propio peso del dispositivo, repercutirá en la utilización de una estructura modular dispuesta para cuatro o para seis motores; por otro lado, la necesidad de disposición de accesorios de grabación o sensores expuestos a condiciones atmosféricas serán condicionantes del cerrado o sellado del dispositivo.

Ante esta variedad de situaciones, un diseño en base a estructuras rectangulares rígidas y láminas o paredes interpuestas permiten la construcción de un dispositivo adaptable a las situaciones antes mencionadas. Especial mención merecen la gran variedad de soluciones enfocadas a motores eléctricos y hélices

existentes en el mercado, siendo la distancia entre brazos del dispositivo un condicionante del tamaño de la hélice y, siendo dicha hélice a su vez, un fuerte condicionante del motor eléctrico que propulsará el dispositivo.

En segundo lugar, en lo que respecta a las condiciones del entorno y que fueron mencionadas en el apartado anterior, con casi total seguridad sea la temperatura el mayor condicionante en las características técnicas de un dispositivo aéreo no tripulado orientado a realizar misiones en la estratosfera. La presencia de temperaturas cercana a -60°C complican sobremanera la selección de materiales y, especialmente, la búsqueda e incorporación al dispositivo de componentes eléctricos y electrónicos que tengan un comportamiento más o menos aceptable en dicha situación.

Si bien la estructura se solventa de forma relativamente fácil (en el aspecto térmico, no tanto en el constructivo) con el empleo de fibra de carbono debidamente tratada para resolver de la manera menos desfavorable posible un posible impacto en el descenso, la selección de las baterías y los motores eléctricos que permitirán el vuelo juega un papel crucial, obviando en este caso la carga útil transportada a la estratosfera que requerirá de un estudio específico en función de cada caso particular. No obstante, de la misma forma que para otros dispositivos enfocados a realizar misiones en las capas alta de la atmósfera o incluso fuera de ella como los satélites, la resolución de la problemática de la temperatura se realiza mediante el estudio y el empleo de un sistema de aislamiento eficaz para componentes vitales para el funcionamiento como sucede con las baterías.

Aplicaciones

Desde el comienzo de la investigación en materia de globos estratosféricos, la ciencia ha hecho un gran uso de estos debido a las características que los mismos poseen como su altura de vuelo, estabilidad y bajo costo; debido a que, gracias a ellos, es posible realizar observaciones y mediciones en situaciones prácticamente espaciales pero con menor coste, tiempo de desarrollo y complejidad que en una misión espacial.

Actualmente multitud de países entre los que cabe destacar China, Canadá, Estados Unidos, India o la Federación Rusa disponen de programas de vuelo para estos sistemas con diversos objetivos entre los cuales podríamos destacar los siguientes:

- Astronomía y Astrofísica: para entre otros la detección y estudios de fuentes de radiación infrarroja, rayos X y rayos gamma.
- Ciencias de la Atmósfera: observación remota e insitu de porciones de la atmósfera mediante diversos métodos, estudio de sustancias y partículas presentes en la atmósfera.
- Ciencias de la tierra: fotografía aérea, cartografía, etc.
- Aplicaciones militares: reconocimiento fotográfico estratégico, uso de globos como blancos para pruebas balísticas.
- Astronáutica: generación de ambientes de microgravedad por caída libre, estudio de la dinámica de vuelo en diferentes regímenes.
- Tecnología: ensayo de vuelo de futuros instrumentos satelitales, prueba de paneles solares y sistemas de comunicaciones, entre otros.

- Publicidad: Campañas publicitarias de alto impacto.
- Telecomunicaciones: Dotación de cobertura a grandes áreas.

Conclusiones

Tras la investigación realizada por los mismos acerca del estado actual de la investigación en la estratosfera para la redacción del presente texto se puede obtener las siguientes conclusiones:

- La finalidad de este artículo es transmitir al lector la posibilidad de utilizar dispositivos de alta altitud, tales como globos, en diferentes sectores de la industria. Siendo estos dispositivos más accesibles que los cohetes sonda principalmente por la normativa que les ampara y la diferencia de costos entre ambos sistemas.
- Estos dispositivos se están desplazando de su sector habitual de investigación hacia nuevas aplicaciones dentro de la corriente NewSpace, debido a su uso por parte de compañías privadas para diversas aplicaciones que van desde el transporte de cargas o turistas a alta altitud a su uso en el sector de las telecomunicaciones.
- Debido al desarrollo confidencial de un sistema para estos ámbitos por los presentes autores del artículo, no se puede hacer una conclusión pública a nivel técnico en lo referente a modos de reutilización más allá de la necesidad de un diseño de nuevos sistemas que cumplan con las características y que puedan ser usados para entre otras las aplicaciones arriba mencionadas.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Director de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València, Dr. D. Juan Antonio Monsoriu Serra por la invitación a redactar el presente artículo. Y al Dr. D. Andrés O. Tiseira Izaguirre por sus consejos y revisiones del mismo.

Referencias

1. R.S. Kremnev, K.M. Pichkhadze, A.M. Zashchirinskii, L.B. Sazonov, et al. "Balloon experiments in the Earth's stratosphere within the Mars-96 project", December 1996, *Advances in Space Research* 17(9):77–80, DOI: 10.1016/0273-1177(95)00679-9.
2. N. Bryan, M. Stewart, D. Granger, B.C. Christner, et al. "A method for sampling microbial aerosols using high altitude balloons", November 2014, *Journal of Microbiological Methods*, DOI: 10.1016/j.mimet.2014.10.007
3. Johnson, D. L., Roberts, B. C., Vaughan, W. W., & Parker, N. C. (2002). Reference and standard atmosphere models.
4. Sissenwine, N., Dubin, M., & Wexler, H. (1962). The US standard atmosphere, 1962. *Journal of Geophysical Research*, 67(9), 3627-3630.
5. Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., & Stenchikov, G. (2009). Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 36(19).
6. Achache, J., Cohen, Y., & Unal, G. (1991). The French program of circumterrestrial magnetic surveys using stratospheric balloons. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72(9), 97-101.

7. Xia, X. L., Li, D. F., Sun, C., & Ruan, L. M. (2010). Transient thermal behavior of stratospheric balloons at float conditions. *Advances in Space Research*, 46(9), 1184-1190.
8. Clark, G. Q., & McCoy, J. G. (1965). Measurement of stratospheric temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 4(3), 365-370. ISO 690
9. Peterzen, S., Masi, S., Dragoy, P., Ibba, R., & Spoto, D. (2008). Long Duration Balloon flights development. *Mem. SA It*, 79, 792-798.
10. Vial, F., Hertzog, A., Mechoso, C. R., Basdevant, C., Cocquerez, P., Dubourg, V., & Nouel, F. (2001). A study of the dynamics of the equatorial lower stratosphere by use of ultra-long-duration balloons: 1. Planetary scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19), 22725-22743.
11. Pfozter, G. (1972). History of the use of balloons in scientific experiments. *Space Science Reviews*, 13(2), 199-242.
12. Yajima, N., Izutsu, N., Imamura, T., & Abe, T. (2009). *Scientific Ballooning: Technology and applications of exploration balloons floating in the stratosphere and the atmospheres of other planets* (Vol. 112). Springer Science Business Media.
13. Keil, M., Heun, M., Austin, J., Lahoz, W., Lou, G. P., & O'Neill, A. (2001). The use of long-duration balloon data to determine the accuracy of stratospheric analyses and forecasts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D10), 10299-10312.
14. Makdissy, T., Gillard, R., Fourn, E., Ferrando-Rocher, M., Girard, E., Legay, H., Le Coq, L. (2016). 'Phoenix' reflectarray unit cell with reduced size and inductive loading. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, 10(12), 1363-1370.
15. Ferrando-Rocher, M., Herranz-Herruzo, J. I., Valero-Nogueira, A., Bernardo-Clemente, B. (2019). Full-metal K-Ka dual-band shared-aperture array antenna fed by combined ridge-groove gap waveguide. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(7), 1463-1467.
16. Herranz-Herruzo, J. I., Valero-Nogueira, A., Ferrando-Rocher, M., Bernardo-Clemente, B., Lenormand, R., Hirsch, A., Barthe, L. (2015, April). Low cost switchable RHCP/LHCP antenna for SOTM applications in Ka-band. In *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-4). IEEE.
17. Baquero-Escudero, M., Valero-Nogueira, A., Ferrando-Rocher, M., Bernardo-Clemente, B., Boria-Esbert, V. E. (2019). Compact combline filter embedded in a bed of nails. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(4), 1461-1471.
18. Ferrando-Rocher, M., Valero-Nogueira, A., Herranz-Herruzo, J. I., Berenguer, A. (2016, June). V-band single-layer slot array fed by ridge gap waveguide. In *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)* (pp. 389-390). IEEE.
19. Berenguer, A., Fusco, V., Ferrando-Rocher, M., Boria, V. E. (2016, April). A fast analysis method for the groove gap waveguide using transmission line theory. In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.
20. Ferrando Rocher, M. (2019). *Gap waveguide array antennas and corporate-feed networks for mm-Wave band applications* (Doctoral dissertation).