



Artículo de investigación original

Diseño de un Globo Doble Super Presurizado Design of a Super Pressurized Double Balloon

Yomber José Montilla López^a, Rafael Simón Torrealba Suárez^{*b}

^aUniversidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Quevedo, Ecuador.

^bUniversidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Departamento de Física, Decanato de Ciencias y Tecnología, Barquisimeto, Venezuela.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.6562087>

Recibido: 23-03-2022

Aceptado: 16-05-2022

Resumen

Un globo super presurizado es una estructura sellada hecha de una membrana delgada de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) reforzada con cuerdas, cuya tensión se calcula para contrarrestar intensos esfuerzos esperados sobre la película que se muestran en este trabajo. Proponemos un diseño de globo doble super presurizado (DSP), con una membrana interna dentro de otra un poco mayor. Ambas membranas están conectadas por películas LLDPE que unen los cordones de cada globo formando paneles externos que rodean la membrana interna. El globo interior está lleno de Hidrógeno, que es un gas barato pero inflamable, mientras que los paneles se llenan con Helio no inflamable pero muy costoso, dado que el volumen interno es mucho mayor que el volumen de los paneles externos, se reduce drásticamente el costo del llenado, que en globos tradicionales se realiza solamente con Helio. En el globo DSP el Hidrógeno debe pasar primero por los paneles exteriores para escapar, lo cual reduce la tasa de pérdida de forma significativa incrementando la seguridad del uso de globos de Hidrógeno. Además, el globo DSP puede tolerar la ruptura de la membrana exterior y la ruptura de la membrana interior si no se rompen en la misma sección.

Palabras claves: globo super presurizado, resistencia de materiales, membrana de LLDPE, permeabilidad a gases.

Código UNESCO: 33.3312 Ciencias tecnológicas. Tecnología de materiales y 33.3301 Ingeniería y tecnología aeronáutica.

Abstract

A super pressurized balloon is a sealed structure made of a thin linear low density polyethylene (LLDPE) membrane reinforced with cords, with tension calculated to counterbalance intense stresses on the film as shown in this paper. We propose a double super pressurized (DSP) balloon design, with an inner membrane inside a slightly larger one. Both membranes are connected by LLDPE films joining the cords of each balloon, creating gore-panels surrounding the internal membrane. The internal globe is filled with Hydrogen, that is inexpensive but inflammable while the external gores will be filled with nonflammable gas Helium, but very expensive. As volume of the internal globe is much larger than the volume of the exterior panels, the cost of filling this double balloon is drastically reduced, compared with traditional balloons completely filled with Helium. In the DSP balloon Hydrogen must go first through the exterior panels in order to escape, then the loss rate of Hydrogen is largely reduced, increasing the security in the use of Hydrogen filled balloons. Also, the double balloon can resist the breaking of the exterior membrane, even the rupture of the inner membrane provided they do not break in the same section.

Keywords: super pressurized balloon, strength of materials, LLDPE membrane, gas permeability.

UNESCO Code: 33.3312 Technological sciences. Materials technology and 33.3301 Aeronautical engineering and technology.

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA es editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), Barquisimeto, Venezuela. ISSN 1856-8890. EISSN 2477-9660. Dep.Legal: pp200702LA2730, ppi201402LA4590. Licencia CC BY-NC-SA

*Autor de correspondencia

Email addresses: ymontilla1@uteq.edu.ec (Yomber José Montilla López), rtorre@ucla.edu.ve (Rafael Simón Torrealba Suárez)

1. Introducción

Los globos estratosféricos son instrumentos de gran importancia para la investigación científica, la tecnología y la exploración espacial. Los globos estratosféricos se usan frecuentemente para estudiar la atmósfera y obtener información ambiental, debido a que llegan a grandes alturas, pueden tomar muestras de contaminantes y monitorear la capa de ozono complementando la información recibida de los satélites que monitorean el clima global, pero que no pueden tomar muestras físicas. Los altos costos de la exploración espacial pueden ser reducidos gracias al uso de nuevos diseños de globos capaces de llevar instrumentos como telescopios o sensores de rayos cósmicos y mantenerse en el aire por tiempos prolongados a alturas donde prácticamente no hay atmósfera (0,5 % a 35 km). La baja densidad de la atmósfera permite hacer mediciones precisas de la cromosfera y campos magnéticos solares y astrometría e incluso astrofotografía de campo profundo sin necesidad de recurrir a un satélite artificial a un costo miles de veces menor que misiones como el Webb o el Hubble.

Numerosos avances del conocimiento de nuestro universo proviene directa o indirectamente de la utilización de globos estratosféricos. El descubrimiento del fondo cósmico de microondas (CMB) se realizó durante la calibración del equipo destinado a detectar las microondas de los primeros satélites de comunicación: Echo 2 era un gran globo de Mylar aluminizado colocado en órbita por un cohete Delta que transmitía y reflejaba las ondas de frecuencia 162 MHz, muy cercana a los 160 MHz del CMB detectadas por Penzias y Wilson [1]. La primera medición de la anisotropía del CMB, predicha por la teoría de la Inflación Cósmica, fue reportada por el proyecto BOOMERANG en el 2000 y realizada por los bolómetros colocados en un globo super presurizado a 40 km de altitud en órbita circumpolar sobre la Antártica [2]. Tres años más tarde, estos resultados fueron confirmados de forma espectacular por el WMAP [3] que realizó observaciones sobre toda la bóveda celeste en lugar de unos pocos grados.

El éxito del proyecto BOOMERANG intensificó el interés en las observaciones utilizando globos super presurizados (SP). Los globos SP pueden mantenerse en vuelo por períodos de hasta 55 días con pocos cambios de altitud y realizar órbitas alrededor de los polos [4] llevados por las corrientes permanentes del vórtice polar; esto los hace ideales para colocar instrumentos de observación científica. En 2013 el laboratorio de rayos cósmicos Super TIGER [5] (Super Trans Iron Galactic Element Recorder) fue colocado en una órbita circumpolar sobre la Antártica. El laboratorio Solar SUNRISE [6] ha sido lanzado y recuperado con éxito en 2009, 2013 y 2021. Para este año 2022 está previsto el lanzamiento del telescopio espacial SuperBit [7] desde el centro espacial Wakana en Nueva Zelanda. La NASA tiene planeado el lanzamiento de su telescopio: ASTHROS (Astrophysics Stratospheric Telescope for High Resolution Observations at Submillimeter-wavelength) para diciembre de 2023 desde la Antártica [8]. Distintos telescopios y detectores de rayos cósmicos ya están siendo probados incluso hay planes para medir la naturaleza cuadrupolar del fondo cósmico de microondas continuando los trabajos pioneros de medición de la anisotropía de fondo cósmico de microondas [9].

Al ascender en la atmósfera la presión baja de forma exponencial, lo cual provoca que el gas dentro de los globos normales (goma o latex) se expandan hasta reventar. Para evitar esto los globos super presurizados se llenan con solo una fracción de su capacidad, de forma tal que a las alturas tengan solo la presión deseada. Los GSP están formados por una película plástica delgada de "polietileno lineal de baja densidad" ó LLDPE (por sus siglas en inglés), terafalato de polietileno (Mylar), polipropileno, tela de poliéster o combinaciones de ellos en capas. Esta membrana está rodeada por cuerdas o cordones de gran resistencia (Zylon) que funcionan como "tensores" sujetando y reforzando la película de plástico (polímero biaxial) en la dirección en la cual su módulo de Young y resistencia a la tracción son menores; es decir, impide que el globo se estire demasiado en la dirección de mayor elasticidad pero de menor resistencia ó dirección longitudinal.

Al expandirse el gas, se forman lóbulos entre los cordones al estirarse la membrana en su dirección transversal que es más resistente pero menos elástica que en la dirección longitudinal. Estos lóbulos o paneles tienen radios de curvatura mucho menores que el radio del globo y dan al globo la forma de una calabaza o lámpara china. Los esfuerzos tangentes sobre la superficie, disminuyen en forma proporcional al radio de curvatura, gracias a lo cual el globo super presurizado puede volar a alturas en las cuales normalmente hubiera explotado por falla del material de la membrana.

En este trabajo se propone un nuevo diseño de globo super presurizado de LLDPE: un globo doble super presurizado (DSP) que consiste de un globo SP dentro de otro globo SP de mayor tamaño. Los dos globos tienen el mismo número de cordones de manera paralela lo cual permite colocar paneles transversales de películas delgadas de LLDPE, que conectan los dos globos formando paneles con forma de banana que rodean el globo interior. El globo interno se llena con gas de Hidrógeno mientras que los paneles exteriores del globo externo se llenan de Helio, un gas no inflamable. Debido que el volumen del globo interno es mucho mayor que el externo, el uso de Helio se reduce notablemente. El Helio se obtiene de depósitos de gas natural mediante un costoso procedimiento de extracción, además es un recurso no renovable insustituible en equipos médicos de Resonancia Magnética Nuclear y otros. El Hidrógeno, en cambio, es

renovable y sumamente económico, lo cuál reduce el costo del llenado de un globo a solo una fracción de su costo en Helio. La empresa Space Perspective [10], que planea colocar turistas en vuelos estratosféricos, ha calculado que el costo de operación de 2 millones de dólares, puede reducirse a la mitad con el uso de Hidrógeno en vez de Helio.

A pesar que la construcción de un globo DSP es más complicada y de mayor peso, presenta varias ventajas con respecto a los globos super presurizados normales. En primer lugar, el globo doble es capaz de resistir rupturas de uno o varios paneles exteriores y continuar volando, la membrana de la superficie externa se calcula para contener el Hidrógeno en caso de ruptura del globo interno. En segundo lugar, para salir del globo, el Hidrógeno debe pasar a través de dos cámaras contenedoras. De acuerdo a la ley de Darcy [11] la permeabilidad de un gas es proporcional a la presión parcial del gas, el Hidrógeno en la cámara externa tendrá una presión parcial baja ya que estos paneles están llenos de Helio, por lo que la tasa de escape de este gas explosivo será muy pequeña.

En la próxima sección se presenta un diagrama del globo DSP de 30 m de diámetro con 102.000 m³ de Hidrógeno y 10.900 m³ de Helio, se calcula el peso del globo, su empuje y capacidad de carga para las condiciones atmosféricas a 30 km de altura y se obtiene la presión manométrica que el globo debe soportar. En la tercera sección, usando teoría de elasticidad lineal, se deduce la ecuación del globo se calculan los esfuerzos tangentes sobre las membranas de LLDPE y se muestra que estos esfuerzos pueden reducirse de 150 MPa a solo 5 MPa gracias a la estructura del globo SP. En la cuarta sección, se calcula el diámetro de las cuerdas tensoras para que puedan compensar el esfuerzo cortante en la dirección longitudinal del globo. En la siguiente sección se discute el modelo de sorción-difusión de gases en polímeros que da lugar a la ecuación de Darcy y se calcula el intercambio de Hidrógeno y Helio entre las cámaras del globo DSP y la tasa de pérdida del Hidrógeno a la atmósfera. En la última sección se discuten los resultados y se presentan las conclusiones.

2. Desarrollo

2.1. Empuje, capacidad de carga y presión de un globo doble super presurizado

En esta sección se calculan los parámetros físicos y mecánicos de un globo doble super presurizado, para ello se toman en consideración los parámetros ambientales de la estratósfera a 30 km de altura basados en el modelo atmosférico de [12] y la teoría lineal de la elasticidad [13].

Las superficies de los globos son aproximadamente esféricas y los radios de curvatura de los lóbulos del globo son mucho menores que los radios de las esferas, su valor está limitado por la máxima separación entre las cuerdas que se obtienen por simple geometría.

El globo doble super presurizado tiene la estructura mostrada en la figura 1, el radio del globo externo se toma $R = 30\text{ m}$, para propósitos ilustrativos se considera que tiene $N = 180$ lóbulos entre igual número de cuerdas, esto corresponde con los globos super presurizados reales de 100000 m³ [14]. El plano mostrado es esquemático y no a escala real, el radio del globo interno es $R - L = 29\text{ m}$, donde $L = 1\text{ m}$ es la distancia que separa los globos y el ancho de la membrana radial que separa los paneles o “lóbulos” del globo exterior.

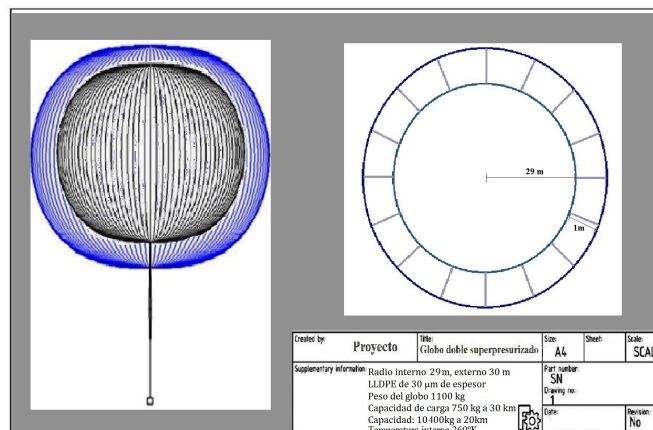


Figura 1: Vista frontal y superior de un globo doble super presurizado.

La característica principal de un globo super presurizado son los cordones o cuerdas tensoras que rodean la membrana plástica de “polo Norte a polo Sur” siguiendo círculos máximos. Estas cuerdas se encuentran sometidas a grandes tensiones, que compensan esfuerzos tangentes cortantes superiores a la resistencia de la membrana. Forman una estructura de soporte que impide que el globo falle. Generalmente las cuerdas son hechas de Zylon, que es un material 10 veces más fuerte que el acero, capaz de soportar pesos de más de 450 kg con solo un 1 mm de diámetro (Resistencia de tracción 4,4 GPa y un límite de ruptura 5,8 GPa) [15]. En la próxima sección se mostrará la ecuación del globo que permite calcular los esfuerzos de la superficie sometida a una presión manométrica ΔP , pero para estimar este diferencial de presión primero debemos discutir los datos atmosféricos.

Para obtener los valores atmosféricos podemos usar el Modelo Atmosférico de la Tierra de la Nasa [12], válido para altura mayores a 25 km en la alta estratósfera

$$T = -131,21 + 0,00299 \times h \quad (2.1)$$

$$P = 2,488 \times ((T + 273,1)/216,6)^{-11,388} \quad (2.2)$$

$$\rho = P/(0,2869 \times (T + 273,1)) \quad (2.3)$$

Usando un valor de $h = 30000$ m las ecuaciones (2.1,2.2,2.3) dan los siguientes valores: densidad del aire $\rho = 1,748 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$; Presión $P = 1,16 \text{ KPa}$ y Temperatura de $T = -41,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

El empuje total se calcula multiplicando los volúmenes de cada globo por la diferencia de densidad entre aire y el gas, que para el caso en consideración es H_2 para el globo interno y He para el externo. Las densidades de los gases se obtienen a partir de la densidad del aire (2.3) y la relación entre los pesos moleculares $\sigma = \rho \times 2/29 = 1,205 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ y la del Helio es el doble de la del Hidrógeno.

$$E = V(\rho - \sigma) + U(\rho - 2\sigma) = 1830 \text{ kg} \quad (2.4)$$

donde $U = 10900 \text{ m}^3$ es el volumen de los paneles externos y $V = 1,02 \times 10^5 \text{ m}^3$ el volumen del globo interno. Los volúmenes se obtienen suponiendo dos esferas concéntricas separadas una distancia L .

El peso de la membrana del globo puede obtenerse sabiendo que el espesor es $e = 0,030 \text{ mm}$ y la densidad para LLDPE de $0,92 \text{ g/cm}^3$ [16]. Esto corresponde una densidad superficial de $\lambda = 0,0276 \text{ g/m}^2$. El peso total del globo DSP se incrementa con el peso de los $N = 180$ mamparos o paredes laterales. El área total S , el peso total w y la capacidad de carga W del globo doble son:

$$S = 4\pi \times (R^2 + (R - L)^2) + \pi \frac{N}{2} (R^2 (R - L)^2) = 38560 \text{ m}^2 \quad (2.5)$$

$$w = S \times \lambda = 1100 \text{ kg} \quad (2.6)$$

$$W = E - w = 730 \text{ kg} \quad (2.7)$$

Para un incremento de temperatura por acción del Sol de $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ con respecto a la del ambiente [17], se espera que el volumen del globo se mantenga casi constante debido a las fuertes cuerdas de Zylon que lo rodean, permitiendo solamente el inflado de las cámaras o paneles externos. El incremento porcentual del volumen total será menor que:

$$\frac{\Delta U}{(V + U)} \times 100 \% < \frac{\Delta T}{T} \frac{U}{V} \approx 1,4 \%$$

Este pequeño incremento de volumen da un empuje adicional de $\Delta E \approx \Delta V(\rho - 2\sigma) \approx 21 \text{ kg}$, lo cual es solo el 1,14 % del empuje total lo que muestra que la altitud será sumamente estable aunque eleva la capacidad de carga a $W \approx 750 \text{ kg}$.

La presión del globo sufrirá un pequeño incremento, el cual produce un intenso esfuerzo cortante sobre la superficie de los globos, podemos estimar el incremento de presión usando ley de gases ideales y considerando el proceso isocórico.

$$P_m = P \frac{\Delta T}{T} \approx 150 \text{ Pa} \quad (2.8)$$

2.2. Ecuación del globo y esfuerzos superficiales

Los esfuerzos tangentes a la superficie de un globo esférico pueden obtenerse del análisis de un elemento diferencial de la superficie sometido a tensiones elásticas. Considérese la fig.2 que muestra un elemento diferencial del globo (de

espesor $e = 0,030\text{ mm}$ mostrado en la figura) sometido a la acción de las fuerzas elásticas dT en dirección “horizontal”, es decir paralelas al plano XY que contiene el ecuador, y las fuerzas dT' que se estiran el elemento en dirección ortogonal a la anterior, que sería la dirección Norte-Sur sobre la esfera terrestre.

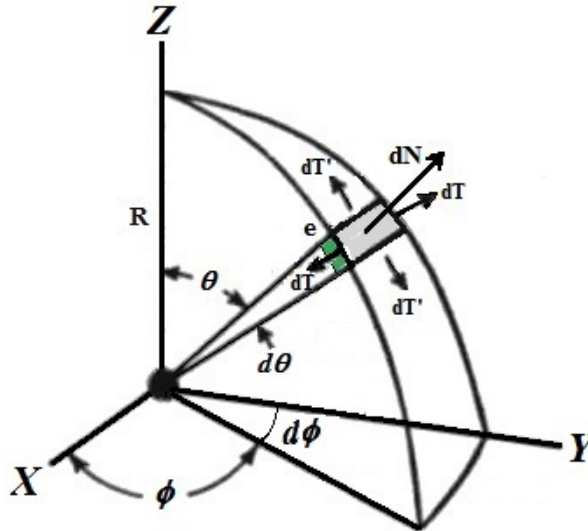


Figura 2: Elemento diferencial del globo sometido a tensión elástica y presión.

La fuerza que ejerce la presión del gas sobre el diferencial de superficie, se representa con dN y se obtiene multiplicando por el diferencial de área perpendicular al radio

$$dN = PR^2 \sin\theta d\phi d\theta \quad (2.9)$$

Debido a la simetría esférica, las fuerzas serán iguales en magnitud $dT = dT'$. El esfuerzo tangente, que llamaremos E_θ , incrementa el tamaño del diferencial de ángulo $d\theta \rightarrow \Delta\theta$ y por lo tanto lo denotaremos $\Delta\theta$ para elongaciones longitudinales en dirección Norte-Sur.

El esfuerzo longitudinal se obtiene dividiendo la tensión elástica por el área cuya normal apunta en la tangente a la superficie en la dirección “Norte-Sur””: $dA_\theta = eR \sin\theta d\phi$.

$$E_\theta = \frac{dT'}{dA_\theta} = \frac{dT'}{eR \sin\theta d\phi} \quad (2.10)$$

donde la variación de la tensión es $dT' = d(T' - T'_0)$, en virtud que la tensión inicial es nula ($T'_0 = 0$) cuando el cuerpo elástico está en su posición de equilibrio (no estirado).

La suma del par de vectores dT' apunta en dirección radial hacia el centro de la esfera, compensando el diferencial de fuerza normal

$$dF_r = 2dT' \sin \frac{\Delta\theta}{2} = dN \rightarrow dT' = \frac{dN}{\Delta\theta}$$

Entonces el esfuerzo tangente se puede expresar en término de la presión manométrica, el radio del globo y el espesor de la membrana. Sustituyendo dT' en (2.10), usando (2.9) se obtiene la ecuación del globo:

$$E_\theta = \frac{dF_r}{eR \sin\theta d\phi \Delta\theta} = P_m \frac{R}{e} \quad (2.11)$$

De forma similar se puede probar la misma relación para el esfuerzo tangente en la dirección horizontal E_ϕ . Usando un diferencial de superficie sometido a las tensiones horizontales dT y el diferencial de área transversal es $dA_\phi = eR d\theta$.

$$E_\phi = \frac{dT}{dA_\phi} = \frac{dT}{eR d\theta} \quad (2.12)$$

En este caso la suma de las tensiones $dF_x = 2dT \sin \frac{\Delta\phi}{2}$ da en dirección horizontal, apuntando al eje Z, entonces tendremos que multiplicar por $\sin \theta$ para proyectar en la dirección radial que es la que debe compensar a la normal dN .

$$dN = dF_x \sin \theta \longrightarrow dT = \frac{dN}{\sin \theta \Delta\phi} \quad (2.13)$$

Ahora sustituyendo la expresión anterior en (2.12), nuevamente se obtiene la ecuación del globo:

$$E_\phi = \frac{dT}{dA_\phi} = \frac{dT}{eR \sin \theta d\phi} = P_m \frac{R}{e} \quad (2.14)$$

Para los valores radio $R = 30 \text{ m}$, espesor $e = 60 \mu\text{m}$ y la presión manométrica calculada en (2.8)

$$E_\theta = 150 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (2.15)$$

Dado que el límite de ruptura (strength break) de los LLDPE es de solo 25 MPa [16], es obvio que la membrana del globo, sin refuerzo, no puede soportar un esfuerzo de 150 MPa . Para compensar estas enormes fuerzas se usan cuerdas de Zylon, que tiene un límite de ruptura de $5,8 \text{ GPa}$ y una resistencia a la tracción de $4,4 \text{ GPa}$ (yield strength) dentro de su régimen lineal. El Zylon es extremadamente costoso y viene en forma de fibras que pueden formar cuerdas pero no membranas impermeables.

En el modelo de globo DSP que se propone, se tienen $N = 180$ cuerdas tensoras de Zylon repartidas de forma equidistantes siguiendo los meridianos de la esfera.

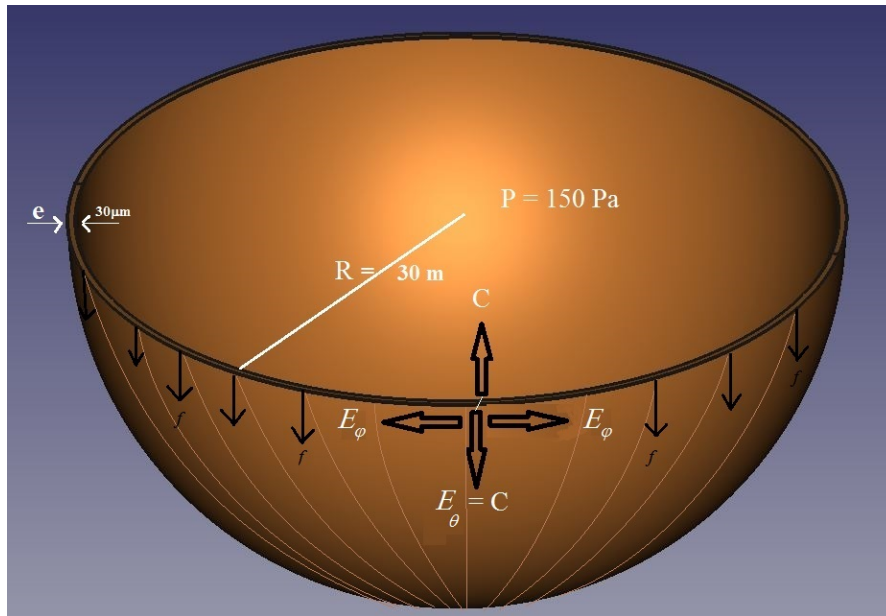


Figura 3: Esfuerzos cortantes sobre un globo super presurizado.

Teniendo en cuenta que los globos super presurizados toman la forma de una calabaza o lámpara china al expandirse la película de LLDPE entre las cuerdas tensoras y asumiendo que estas cuerdas no se expanden debido a su gran rigidez, las bolsas o lóbulos entre dichas cuerdas están sometidas a un esfuerzo en la dirección transversal E_ϕ mucho menor debido a su menor radio de curvatura. En la dirección longitudinal el esfuerzo tangente sigue siendo $E_\theta = 150 \text{ MPa}$ y debe ser compensado por las cuerdas tensoras del globo. Para un globo de $R = 30 \text{ m}$ y $N = 180$ cuerdas el radio de curvatura mínimo es la mitad de la distancia entre las cuerdas. En este trabajo vamos a asumir que el radio de curvatura es igual a la separación entre las cuerdas en la región ecuatorial con lo cual el esfuerzo sobre la superficie en la dirección transversal u horizontal se reduce a:

$$E_\phi = P_m \frac{r}{e} = 5,2 \text{ MPa} \quad (2.16)$$

$$r \approx \frac{2\pi R}{N} = 1,08 \text{ m} \quad (2.17)$$

Gracias al uso de las cuerdas tensoras, las películas de LLDPE de los globos super presurizados pueden resistir los esfuerzos generados por la presión manométrica interna. El cambio es sustancial, ya que los esfuerzos cortantes cambian de 150 MPa, que es 8 veces mayor que el límite de ruptura, a 5,2 Mpa que es 5 veces menor que la resistencia del material.

2.3. Tensiones y grosor de las cuerdas tensoras

La tensión de las $N = 180$ cuerdas o cordones que rodean el globo en la dirección del ángulo θ puede calcularse fácilmente debido a la simetría esférica.

Las fuerzas tangentes pueden interpretarse como esfuerzos cortantes o de cizalladura ya que la membrana es muy delgada podemos colocar un esfuerzo en la cara exterior y otro en la cara interior de cada una de las esferas, $C = E_\theta$ como muestra la fig. 3

Multiplcando el área de la sección ecuatorial de la esfera por el esfuerzo cortante se obtiene la fuerza F sobre la máxima área transversal, la tensión sobre cada cuerda se obtiene dividiendo está fuerza por el número de cuerdas

$$F = E_\theta \times (2\pi R e) \quad (2.18)$$

$$f = \frac{F}{N} = 7850 N \quad (2.19)$$

Cada cuerda tensora está sometida a una tensión de $f = 805 \text{ kg}$ para una fuerza total de 145000 kg .

El diámetro mínimo para que resista está tensión sin fractura es

$$\Phi = \sqrt{\frac{4f}{5,8\pi \times 10^9}} = 1,13 \text{ mm} \quad (2.20)$$

de forma tal que con 180 cuerdas tensoras de zylon con $\Phi = 2 \text{ mm}$ de diámetro, se puede compensar totalmente el esfuerzo cortante con un factor de seguridad de 3 (límite de ruptura 2500 kg) y menor a la resistencia a la tracción de 1400 kg [15] para este diámetro.

Estos resultados pueden compararse con los valores reportados en la referencia [18] para un globo super presurizado con un radio aproximado de $R = 50 \text{ m}$, una película de LLDPE con un espesor $e = 60 \mu\text{m}$, a una presión manométrica de $P_m = 180 \text{ Pa}$ y con $N = 280$ cuerdas reportó una tensión por cuerda de 7000 N muy semejante al valor obtenido en (2.19). Simulando el globo mediante elementos finitos, reportan un esfuerzo máximo en la zona ecuatorial de $9,57 \text{ MPa}$ [18], que es menor al que se obtiene aplicando (2.17) y (2.16), ya que no se cuenta con una ecuación exacta del radio de curvatura, ya que la forma de calabaza que toma el globo es muy compleja. Además el globo en [18] no es esférico, sino achatado y por tanto las ecuaciones solo pueden resolverse de manera numérica, lo cual no va más allá de los objetivos de este trabajo.

2.4. Permeabilidad de la membrana de LLDPE a gases

Las membranas se clasifican en porosas y no porosas de acuerdo a la presencia o no, de poros que comuniquen las caras exteriores de la membrana. La película de LLDPE se considera una membrana no porosa debido a que no existe evidencia de poros mayores a 2 nm [19], y por lo tanto se considera que la membrana es densa. Las membranas no porosas consisten básicamente en cadenas poliméricas mezcladas con estructuras cristalinas de manera amorfa. Debido al movimiento natural de las cadenas, se crean pasadizos y por lo tanto, el transporte gases se basa en el flujo a través de éstos. En las membranas densas, la naturaleza química del polímero será el aspecto fundamental que regirá el transporte de distintos gases de acuerdo a la capacidad de sorción de la membrana para cada gas, seguida por la difusión a través de la membrana, bajo influencia de una fuerza impulsora aplicada, mecanismo llamado Solución-Difusión [20]. Los índices relativos de sorción y difusión de gases, conducen a la separación de la mezcla de gases, lo cual tiene una gran aplicabilidad en la industria de materiales, alimentos y medicina.

El método de preparación de la membrana es otro factor a ser considerado es . Existen dos métodos básicos de producción de láminas [21]: extrusión de película soplada (blown extrusion) y extrusión de película fundida (cast extrusion). En el primero un rodillo recoge el material fundido de una burbuja, que se forma al soplar dentro del plástico fundido. El segundo es un proceso continuo en el que un material termoplástico fundida se se extruye desde una matriz ranurada a un rodillo frío, se enfría y se enrolla. El segundo método permite producir películas con menor variación de espesor y pueden combinarse varios extrusores para crear láminas que pueden combinar distintas capas plásticas de diferentes espesores o materiales y es el utilizado para las membranas de los globos estratosféricos. Adicionalmente, las películas

pueden ser sometidas a procesos térmicos y/o mecánicos como el templado o se le pueden añadir fibras o materiales de refuerzo.

La permeabilidad de las membranas a los gases puede estimarse mediante la ecuación de Darcy [22], en la que el coeficiente de permeabilidad es el producto de la constante de difusión por el coeficiente de sorción. Esta ecuación puede aplicarse de manera fenomenológica.

$$\frac{d\Psi}{dt} = c \frac{A}{e} P_m \quad (2.21)$$

donde Ψ es el flujo del gas, c la constante de permeabilidad del gas, A el área de la membrana, e su espesor y la P_m presión manométrica parcial de cada gas.

La permeabilidad del LLDPE para H_2 , O_2 y N_2 a temperatura de 25°C y una presión de una atmósfera, se tomaron de [23], el valor para el He se tomó de [22]:

Hidrógeno	$c_{H_2} = 8,0 \times 10^{-13} \frac{cm^3_{STP} cm}{Pa cm^2 s}$
Helio	$c_{He} = 4,0 \times 10^{-13} \frac{cm^3_{STP} cm}{Pa cm^2 s}$
Oxígeno	$c_{O_2} = 2,1 \times 10^{-13} \frac{cm^3_{STP} cm}{Pa cm^2 s}$
Nitrógeno	$c_{N_2} = 0,7 \times 10^{-13} \frac{cm^3_{STP} cm}{Pa cm^2 s}$

Cuadro 1: Tabla de coeficientes de permeabilidad para LLDPE.

El flujo está dado en cm^3_{STP}/s , donde son centímetros cúbicos del gas a presión y temperatura estandar por segundo.

Podemos calcular las concentraciones molares de Hidrógeno y Helio en cada una de las cámara U y V . La densidad molar de cada gas en cada cámara es el número de moles dividido por el volumen de esa cámara del globo DSP. La permeabilidad LLDPE baja con la temperatura pero su comportamiento a muy bajas presiones varía en la literatura [22], por esto los valores de la tabla pueden tomarse como un límite superior para la permeabilidad y podemos calcular los valores de las pérdidas de Hidrógeno y Helio con presión $P_o = 1 \text{ Atm}$ y una temperatura $T_o = 25 \text{ °C}$; ya que el Hidrógeno es menos inflamable a 30 Km de altura, a una temperatura de -41 °C y una densidad 70 veces menor a la del nivel del mar.

Considerese el globo DSP presentado en la sección 2; llamaremos $N_{H_2}^{(1)}$ el número de moles de Hidrógeno del volumen interno V , $N_{H_2}^{(2)}$ el número de moles de Hidrógeno en la cámara exterior U . Usando la ley de Darcy (2.21) en conjunto con la ecuación de gases ideales podemos escribir el cambio del número de moles de este gas en el volumen V :

$$\frac{dN_{H_2}^{(1)}}{dt} = -\alpha_1 \left[\frac{N_{H_2}^{(1)}}{V} - \frac{N_{H_2}^{(2)}}{U} \right], \quad \alpha_1 = c_{H_2} \frac{A_1}{e} RT_o \quad (2.22)$$

donde A_1 es el área del globo interior, R la constante universal de los gases, $T_o = (25 + 273, 1) \text{ °K}$ la temperatura ambiente y $e = 30 \mu m$ como en las secciones anteriores.

Teniendo en cuenta el factor RT_o es fácil reconocer que el factor entre los corchetes es la presión manométrica por RT_o . El cambio del número de moles de Hidrógeno en V justamente el flujo Ψ de la ecuación (2.21). Si consideramos ahora el volumen exterior U , el número de moles de Hidrógeno que salen de V son los que entran a U menos los que salen a la atmósfera. Debido a que la presión de Hidrogeno en la atmósfera exterior es cero, la presión parcial del Hidrógeno dentro de U es manométrica y:

$$\frac{dN_{H_2}^{(2)}}{dt} = \alpha_1 \left[\frac{N_{H_2}^{(1)}}{V} - \frac{N_{H_2}^{(2)}}{U} \right] - \alpha_2 \left[\frac{N_{H_2}^{(2)}}{U} \right], \quad \alpha_2 = c_{H_2} \frac{A_2}{e} RT_o \quad (2.23)$$

donde A_2 es el área del globo interior.

De manera similar se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales para los moles de Helio:

$$\frac{dN_{He}^{(1)}}{dt} = \beta_1 \left[\frac{N_{He}^{(1)}}{V} - \frac{N_{He}^{(2)}}{U} \right], \quad \beta_1 = c_{He} \frac{A_1}{e} RT_o \quad (2.24)$$

$$\frac{dN_{He}^{(2)}}{dt} = \beta_1 \left[\frac{N_{He}^{(1)}}{V} - \frac{N_{He}^{(2)}}{U} \right] - \beta_2 \left[\frac{N_{He}^{(2)}}{U} \right], \quad \beta_2 = c_{He} \frac{A_2}{e} RT_o \quad (2.25)$$

Las ecuaciones (2.22) con (2.23) y (2.24) con (2.25) forman 2 sistemas desacoplados de 2 ecuaciones diferenciales de primer orden que en conjunto con las condiciones iniciales:

$$N_{H_2}^{(1)}(0) = \frac{P_o V}{RT_o}, \quad N_{H_2}^{(2)}(0) = 0, \quad (2.26)$$

$$N_{He}^{(1)}(0) = 0, \quad N_{He}^{(2)}(0) = \frac{P_o U}{RT_o}, \quad (2.27)$$

Tiene solución exacta bien conocida, que sin embargo es muy engorrosa de escribir y es conocida en la literatura [24]. Es más ilustrativo mostrar la gráfica de la integración numérica para los parámetros especificados a nivel del suelo para el globo DSP.

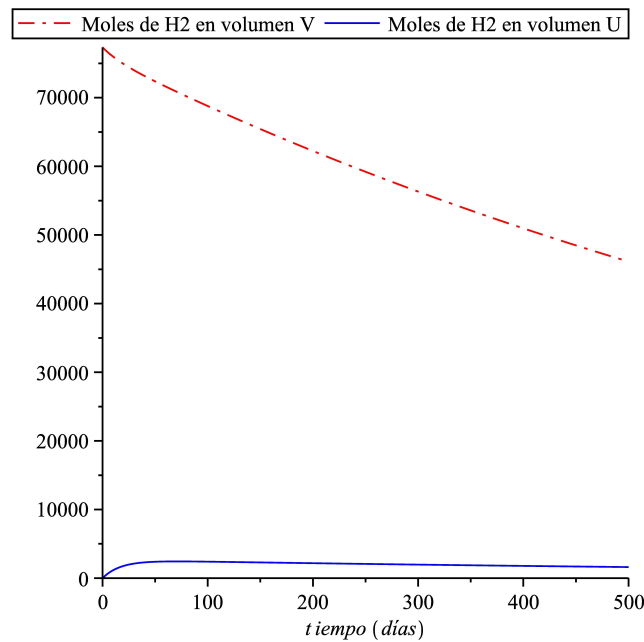


Figura 4: Cantidad de H_2 en cámara interna (V) y externa (U) de un globo DSP.

Como puede verse en la fig.4, el globo interno V pierde el Hidrógeno con un coeficiente exponencial pequeño. El Hidrógeno va primero al volumen U , hasta un valor aproximado de 2200 moles y después todo lo que entra a U , sale a la atmósfera.

En la fig.5 podemos apreciar que el Helio se escapa con un decaimiento exponencial mucho mayor que el Hidrógeno, esto se debe a que el volumen U tiene dos caras por donde escapa el gas, una acumula aproximadamente 2200 moles dentro del volumen interior V y por la otra se pierde el Helio a la atmósfera. Aproximadamente a los 100 días, se ha perdido un 10 % del Hidrógeno, lo cual generalmente se toma como fuera de parámetro para los globos SP [17].

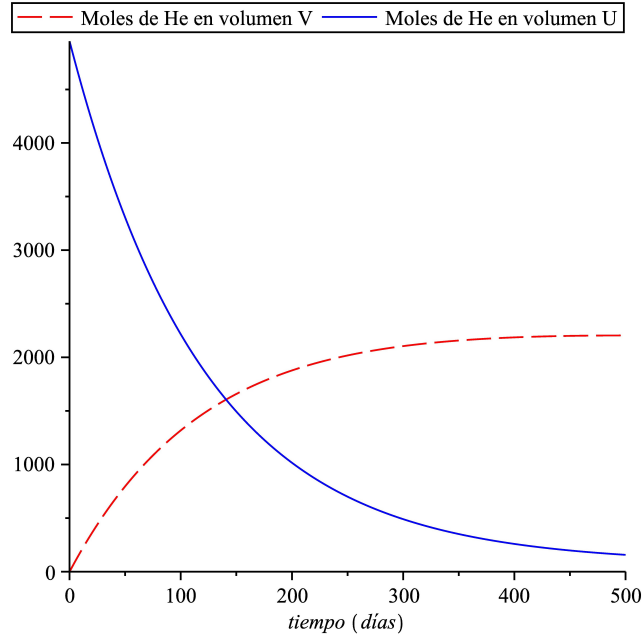


Figura 5: Cantidad de Helio en función del tiempo en cámara interna (V) y externa (U).

Es instructivo comparar la tasa de pérdida de Hidrógeno de un globo DSP con la de un globo SP de una única cámara. Para el globo simple podemos utilizar la ley de Darcy considerando que tiene un radio $R = 3 \text{ m}$, de forma tal que tiene la misma área, pero tomando una membrana del doble del espesor $2e = 60 \mu\text{m}$ ya que el globo DSP tiene 2 cámaras.

De acuerdo a (2.21), para el globo simple SP la tasa de pérdida es

$$t^{SP} = \alpha \frac{NH_2^{SP}}{V}$$

que cumple la ecuación:

$$\frac{dNH_2^{SP}(t)}{dt} = -\alpha \frac{NH_2^{SP}(t)}{V}, \quad \alpha = c_{H_2} \frac{A_2}{2e} RT_o \quad (2.28)$$

La fig.6 muestra los resultados numéricos de la ecuación (2.23) con (2.26) y (2.28) con condición inicial:

$$NH_2^{GSP}(0) = \frac{P_o V}{RT_o} \quad (2.29)$$

para el globo simple SP comparada con el resultado de la cantidad de moles de H_2 por unidad de tiempo que escapa por la cara exterior A_2 del globo doble super presurizado DSP a la atmósfera, que es el último término de la ecuación (2.23)

$$t^{GDSP} = \frac{\alpha_2}{U} N_{H_2}^{(2)}(t) \quad (2.30)$$

donde $N_{H_2}^{(2)}(t)$ se obtiene integrando (2.23) y puede observarse en la parte inferior de la fig. 4.

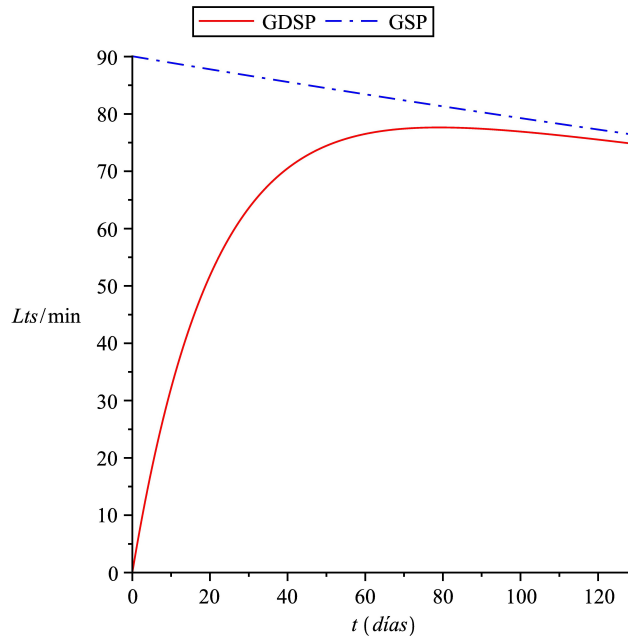


Figura 6: Tasa de pérdida de H_2 en globos GSP (simple) y GDSP(doble).

En esta última figura puede observarse que el valor de pérdida de Hidrógeno del globo simple SP es alto desde el primer instante (90 lts/min), lo que hace la operación de llenado y despegue de alto riesgo, ya que ambas duran varias horas. Por otra parte el globo doble SP inicialmente tiene cero pérdidas la cual se va incrementando con el paso de los días, pero proporciona mucha seguridad las primeras horas que son las operaciones críticas de llenado y despegue. De acuerdo a los valores numéricos obtenidos el globo doble super presurizado alcanza un 10 % de las pérdidas del globo simple 2,5 días después del despegue; para ese entonces ya estará a una gran altitud donde las bajas temperaturas y la atmósfera enrarecida proporcionan una seguridad adicional anti-incendio que no es considerada en este trabajo.

3. Discusión y conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño de un globo doble super presurizado, con la finalidad de mejorar la seguridad del uso de Hidrógeno como gas elevador. El globo DSP propuesto está compuesto por 2 cámaras esféricas de LLDPE de 29 y 30 metros de diámetro, dispuestas de manera concéntrica y conectadas por mamparos de LLDPE, todas las membranas tienen un espesor de $30 \mu m$. Ambas cámaras del globo doble super presurizado están rodeadas de 180 cuerdas de Zylon de forma hemisférica y a la misma presión manométrica.

El empuje total del globo DSP propuesto a 30 Km de altitud fue calculado (2.4) en 1830 kg utilizando el modelo atmosférico [12]. Dado que el peso de las membranas de las 2 cámaras del globo junto con los mamparos es (2.6) de 1100 kg, se obtiene una capacidad de carga útil de 730 kg a una altura de 30 km, por lo que la góndola e instrumental científico no debe superar este peso.

Se calculó el globo para resistir una presión manométrica (2.8) de 150 Pa debida a la variación de temperatura producida por el calentamiento diurno. Esta pequeña presión produce un enorme esfuerzo tangente sobre la superficie del globo de 150 MPa en la dirección longitudinal (2.10), que es compensada por las 180 cuerdas de Zylon que resisten una tensión de 7850 N cada una (2.19) y es semejante a la tensión de 7000 N con reportada en [18] para un globo SP con 280 cuerdas, 50 m de diámetro, una presión de 180 Pa e igual esfuerzo tangente de 150 MPa.

Se obtuvo un diámetro mínimo (2.20) de las cuerdas de 1,3 mm, por lo que se propone utilizar 2 mm de diámetro que tiene un límite de ruptura de 2500 kg dando un factor de seguridad de 3. El peso de la góndola de instrumentos no es relevante para el cálculo de la resistencia de las cuerdas ya que solo es 4,2 kg extra por cuerda, lo cual es tan solo un incremento del 0,6 %.

Se discute el esfuerzo tangente en la dirección transversal a los cordones ($E\phi$). Este esfuerzo es mucho menor que ($E\theta$), debido a que el radio de curvatura también es mucho menor, del orden de la separación entre las cuerdas (2.17). Se estimó un valor de 5,2 Mpa como máximo en la zona ecuatorial (2.16) el cual es 5 veces menor que el límite de ruptura

del LLDPE [23] considerado. Este valor es menor que el calculado en [18], pero no se dispone de una ecuación que permita calcular exactamente el radio de curvatura los lóbulos que forman los paneles exteriores, a la baja presión de la atmósfera a 30 km de altura.

Se utilizó la ley de Darcy para construir un modelo matemático del flujo de gases entre las cámaras del globo y el exterior. Considerando que la cámara interna se llena de Hidrógeno y la externa de Helio al momento del despegue, se obtiene que el escape de Hidrógeno a la atmósfera es prácticamente nulo las primeras horas, alcanzando solo un décimo de las emisiones de un globo simple SP después del segundo día. En cambio el globo simple SP, pierde Hidrógeno a rata de 90 ltr/min, siendo esta tasa máxima al momento del despegue. El globo DSP solo alcanza valores cercanos a los del globo simple (ver fig.6) después de más de 100 días de vuelo.

En caso de ruptura de la cámara interna, el globo seguirá volando, ya que las presiones de ambas cámaras son iguales, y por lo tanto el esfuerzo (2.16) sobre las paredes externas no cambiará. Incluso, en caso de ruptura simultánea del globo interno y uno de los paneles externos (liberando el 90 % del gas) los restantes paneles aún inflados actuarían como freno aerodinámico evitando que la góndola en caída alcance velocidades supersónicas y llegar a bajas alturas a velocidad adecuada para el funcionamiento de paracaídas tradicionales.

Se concluye que la construcción de un globo doble super presurizado es viable a pesar del incremento de complejidad y peso de la estructura. Un globo DSP puede resistir la ruptura accidental de una de las membranas del globo, mientras que en un globo SP de una sola cámara escaparía todo el gas. También el globo doble super presurizado permite utilizar gas de Hidrógeno de manera más segura que un globo SP simple ya que tiene una pérdida de gas mucho menor, especialmente al momento del despegue. Adicionalmente la utilización de Hidrógeno reduce de manera drástica los costos de las misiones para enviar equipos científicos a la estratósfera y permite salvaguardar un recurso valioso como el Helio.

Referencias

- [1] H. Kragh, *Cosmology and controversy : the historical development of two theories of the universe*. NJ, EEUU: Princeton Univ. Press., 1999.
- [2] C. J. MacTavish, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, A. Boscaleri, P. Cabella, C. R. Contaldi, B. P. Crill, P. de Bernardis, G. D. Gasperis, A. de Oliveira-Costa, G. D. Troia, G. D. Stefano, E. Hivon, A. H. Jaffe, W. C. Jones, T. S. Kisner, A. E. Lange, A. M. Lewis, S. Masi, P. D. Mauskopf, A. Melchiorri, T. E. Montroy, and P. Natoli, “Cosmological parameters from the 2003 flight of BOOMERANG,” *Astrophys. J.*, vol. 647, pp. 799–812, 2006.
- [3] E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, C. L. Bennett, B. Gold, G. Hinshaw, N. Jarosik, D. Larson, M. R. Nolte, L. Page, D. N. Spergel, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright, “Seven-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: are there cosmic microwave background anomalies?,” *Astrophys. J. Suppl.*, vol. 192, p. 17, 2011.
- [4] G. Manney, R. Zurek, and A. O’Neill, “On the motion of air through the stratospheric polar vortex,” *Journal of the Atmospheric Sciences.*, vol. 51(20), pp. 2973–94, 1994.
- [5] P. W. Gorham, “Particle Astrophysics in NASA’s Long Duration Balloon Program,” *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, vol. 243-244, pp. 231–238, 2013.
- [6] P. Barthol and A. Gandorfer and S. K. Solanki and M. Schüssler and B. Chares and W. Curdt and W. Deutsch and A. Feller and D. Germerott and B. Grauf and K. Heerlein and J. Hinzberger and M. Kollack and R. Meller and R. Müller and T. L. Riethmüller and G. Tomasch and M. Knölker and B. W. Lites and G. Card and D. Elmore and J. Fox and A. Lecinski and P. Nelson and R. Summers and A. Watt and V. Martínez Pillet and J. A. Bonet and W. Schmidt and T. Berkefeld and A. M. Title and V. Domingo and J. L. Gasent Blesa and J. C. del Toro Iniesta and A. López Jiménez and A. Álvarez-Herrero and L. Sabau-Graziati and C. Widani and P. Haberler and K. Härtel and D. Kampf and T. Levin and I. Pérez Grande and A. Sanz-Andrés and E. Schmidt, “The Sunrise Mission,” *Solar Phys.*, vol. 268, p. 1, 2011.
- [7] L. J. Romualdez, S. J. Benton, A. M. Brown, P. Clark, C. J. Damaren, T. Eifer, A. A. Fraiser, M. N. Galloway, J. W. Hartley, M. Jauzac, W. C. Jones, L. Li, T. T. Luu, R. J. Massey, J. McCleary, C. B. Netterfield, S. Redmond, J. D. Rhodes, J. Schmoll, and S. Tam, “Overview, design, and flight results from SuperBIT: a high-resolution, wide-field, visible-to-near-UV balloon-borne astronomical telescope,” in *Proc. SPIE. 10702 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, (Austin Texas, USA), pp. 107–120, 2018.
- [8] Jet Propulsion Laboratory, “Astrhos,” 2022. Last accessed 2022.
- [9] B. Rabii, C. D. Winant, M. E. Abroe, P. Ade, A. Balbi, J. J. Bock, J. Borrill, A. Boscaleri, P. de Bernardis, J. S. Collins, P. G. Ferreira, S. Hanany, V. V. Hristov, A. H. Jaffe, B. R. Johnson, A. E. Lange, A. T. Lee, C. B. Netterfield, E. Pascale, P. L. Richards, G. F. Smoot, R. Stompor, and J. H. P. Wu, “MAXIMA: A balloon - borne cosmic microwave background anisotropy experiment,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, p. 071101, 2006.
- [10] N. McGreevy, “For 125,000, you could ride a balloon into the stratosphere,” 2020. Last accessed 16 March 2022.
- [11] T. W. Lambe and R. V. Whitman, *Mecánica de suelos*. México DF, México: Editorial Limusa, 2004.
- [12] Glenn Research Center, “Earth atmosphere model,” Last accessed 16 March 2022.
- [13] L. Landau and E. Lifshitz, *Teoría de la Elasticidad: Curso de Física Teórica, Vol 7*. Barcelona, España: Editorial Reverte, 1969.
- [14] M. Smith and E. Rainwater, “Optimus designs for super pressure balloons,” *Advances in Space Research*, vol. 53 (10), pp. 1688–1693, 2004.
- [15] TOYOBO, “Pbo fiber zylon,” 2005. Last accessed 16 March 2022.
- [16] ExxonMobil, “Lldpe ll 1002yb,” 2013. Last accessed 16 March 2022.
- [17] Nasa’s Balloon Program Office, “Scientific balloons,” Last accessed 2020.
- [18] Nasa Balloon Program Office, “Earth atmosphere model,” Last accessed 2020.
- [19] M. J. Quezada, *Permeabilidad de Gases en Láminas Ultradelgadas*. PhD thesis, Universidad de santiago de Chile, 2013.
- [20] J. Q. B. García, *Determinación de los coeficientes de solubilidad, difusión y permeabilidad de gases en polímeros mediante la técnica de decaimiento de presión*. PhD thesis, Universidad Iberoamericana, 2007.

- [21] A. A. I. Balado, *Efecto del Templado sobre la Permeación de Gases a través de filmes de LLDPE obtenidos por coextrusión*. PhD thesis, Universitat Jaume I, 1998.
- [22] J. P. García, *Transporte Gaseoso en Membranas Poliméricas densas de LLDPE*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2003.
- [23] ExxonMobil, “Lldpe ll 1002yb,” 2013. Last accessed 16 March 2022.
- [24] G. Arfken and H. Weber, *Mathematical Methods for Physicists*. NY, EEUU: Academic Press, 1995.

Sobre los autores

Yomber José Montilla López

Profesor de Física. Magister Scientiarum en Ciencias, mención Física Matemáticas. Profesor adscrito a la carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador. Correo electrónico: ymontillal@uteq.edu.ec

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8592-248X>

Rafael Simón Torrealba Suárez

Licenciado en Física. Doctor en Física. Director del programa de Licenciatura en Física. Profesor adscrito al Departamento de Física, Decanato de Ciencias y Tecnología. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Estado Lara, Venezuela.

Correo electrónico: ftorre@ucla.edu.ve

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7549-408X>

Forma de citar:

Y. J. Montilla López y R. S. Torrealba Suárez, “Diseño de un Globo Doble Super presurizado”, *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol 15, nro 2, pp. 61-73, 2021. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

Fuentes de financiamiento:

Esta investigación fue financiada por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

Contribuciones intelectuales de los autores:

Concepción y diseño del trabajo: YJML, RSTS.

Adquisición, análisis o interpretación de los datos: YJML, RSTS.

Redacción y/o revisión crítica del manuscrito: YJML, RSTS.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.