

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 8. TÉCNICAS DE GLOBOS .....	829
8.1 Globos .....	829
8.1.1 Principales tipos de globos .....	829
8.1.2 Materiales y propiedades de los globos .....	829
8.1.3 Especificaciones de los globos .....	830
8.2 Comportamiento de los globos .....	830
8.2.1 Velocidad de ascenso .....	830
8.2.2 Rendimiento de los globos .....	831
8.3 Manejo de los globos .....	832
8.3.1 Almacenamiento .....	832
8.3.2 Acondicionamiento .....	833
8.3.3 Inflado .....	833
8.3.4 Lanzamiento .....	834
8.4 Accesorios para ascensos de globos .....	834
8.4.1 Iluminación para ascensos nocturnos .....	834
8.4.2 Paracaídas .....	835
8.5 Gases de inflado .....	835
8.5.1 Generalidades .....	835
8.5.2 Bombonas de gas .....	835
8.5.3 Generadores de hidrógeno .....	836
8.6 Utilización del hidrógeno y precauciones de seguridad .....	837
8.6.1 Generalidades .....	837
8.6.2 Diseño de edificios .....	837
8.6.3 Cargas estáticas .....	838
8.6.4 Vestimenta de protección e instalaciones de primeros auxilios .....	839
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA .....	841

## **CAPÍTULO 8. TÉCNICAS DE GLOBOS**

### **8.1 GLOBOS**

#### **8.1.1 Principales tipos de globos**

Hay dos grandes categorías de globos utilizados en meteorología:

- a) Los globos piloto, que se utilizan para medir visualmente el viento en altitud, y los globos sonda para la medición de la altura de la base de las nubes. No suelen llevar una carga apreciable, por lo que son considerablemente más pequeños que los globos de radiosonda. Son casi siempre extensibles y esféricos, y de ellos se requiere ante todo que, además de poder alcanzar alturas satisfactorias, mantengan su forma esférica mientras ascienden.
- b) Los globos utilizados para transportar instrumentos para el registro o la transmisión de las observaciones en altitud corrientes suelen ser del tipo extensible y de forma esférica. Se denominan habitualmente globos de radiosonda o de sondeo. Deberían poseer el tamaño y la calidad suficientes para poder transportar la carga requerida (por lo general, entre 200 g y 1 kg) a alturas de hasta 35 km, a una velocidad de ascenso lo bastante rápida como para permitir una aireación razonable de los elementos de medición. Para la medición de vientos en altitud mediante radar se utilizan globos piloto grandes (100 g) o globos de radiosonda, según el peso y la resistencia del equipo transportado.

Hay otros tipos de globos, utilizados para fines especiales, que no se describen en el presente capítulo. Los globos de nivel constante, que ascienden hasta un nivel predeterminado y flotan en él, están fabricados de material inextensible. Los globos grandes de nivel constante se llenan parcialmente en el momento del lanzamiento. Los globos de superpresión de nivel constante se llenan de modo que se inflen completamente al efectuarse el lanzamiento. Los globos tetraédricos son pequeños globos de nivel constante y de superpresión utilizados para estudios de trayectoria. El uso de globos cautivos para la obtención de perfiles se aborda en el capítulo 5 de la parte II.

#### **8.1.2 Materiales y propiedades de los globos**

Los mejores materiales básicos para los globos extensibles son el látex de caucho natural de alta calidad y un látex sintético a base de policloropreno. El látex natural conserva su forma mejor que el policloropreno, que es más fuerte y puede fabricarse de mayor grosor para obtener las prestaciones deseadas. Resulta menos afectado por la temperatura, pero resiste peor el ozono y las radiaciones ultravioleta a grandes altitudes, y su duración en almacén es menor. Ambos materiales pueden llevar incorporados diversos aditivos para mejorar su duración en almacén, su resistencia y sus prestaciones a bajas temperaturas, tanto durante el almacenamiento como en vuelo, y para resistir el ozono y la radiación ultravioleta. Durante la fabricación de los globos que se desea llenar de hidrógeno puede añadirse también un agente antiestático como precaución frente a posibles explosiones.

Hay principalmente dos procesos para la producción de globos extensibles. Uno de ellos consiste en sumergir un armazón en una emulsión de látex, y el otro, en modelar el globo sobre la cara interior de un molde hueco. Este último método permite fabricar los globos con un grosor más uniforme, lo cual es deseable para alcanzar grandes altitudes a medida que el globo se expande, y el cuello puede fabricarse formando una sola pieza con el resto, con lo que se evita la aparición de puntos débiles.

Para los globos de nivel constante, el material inextensible que se emplea es el polietileno.

### 8.1.3 Especificaciones de los globos

Una vez terminados, los globos deberían estar libres de materias extrañas, pinchazos u otros defectos, y deberán ser homogéneos y de grosor uniforme. Deberían estar provistos de cuellos de entre 1 y 5 cm de diámetro y de 10 a 20 cm de longitud, según el tamaño del globo. En los globos de sondeo los cuellos tendrían que poder soportar una fuerza de hasta 200 N sin sufrir daños. Para evitar que el cuello llegue a desprenderse, es importante que el grosor de la envoltura aumente gradualmente en dirección a aquel; toda discontinuidad brusca del grosor constituirá un punto débil.

En cuanto al tamaño, los globos se identifican mediante su peso nominal en gramos. El peso real de un globo no debería diferir del peso nominal especificado en más de un 10%, y preferiblemente, un 5%. Al expandirse, el globo debería poder alcanzar un diámetro como mínimo cuatro veces, y preferiblemente cinco o seis veces, superior al original, y mantenerlo durante al menos una hora. La geometría del globo inflado debería ser esférica o en forma de pera.

La duración de los globos en almacén es un aspecto importante, especialmente en condiciones tropicales. Aunque pueden realizarse pruebas de envejecimiento artificial, sus resultados no son muy indicativos. Una de ellas consiste en mantener el globo de muestra en un horno a 80 °C durante cuatro días, situación que se considera equivalente a unos cuatro años en los trópicos, después de lo cual el globo debería seguir siendo capaz de producir la expansión mínima requerida. Un embalado cuidadoso de los globos para evitar exponerlos a la luz (especialmente a la luz del sol), al aire fresco o a temperaturas extremas es esencial para evitar un deterioro rápido.

Los globos fabricados con látex sintético incorporan un plastificante que les permite resistir el endurecimiento o congelación del material a las bajas temperaturas reinantes en torno a la tropopausa y a altitudes superiores. Algunos fabricantes proponen distintos tipos de globo para usos diurnos y nocturnos, con cantidades diferentes de plastificante.

## 8.2 COMPORTAMIENTO DE LOS GLOBOS

### 8.2.1 Velocidad de ascenso

Según el principio de flotabilidad, la fuerza ascensional total de un globo viene dada por la flotabilidad del volumen de gas que contiene, a saber:

$$T = V(\rho - \rho_g) = 0,523 D^3 (\rho - \rho_g) \quad (8.1)$$

donde  $T$  es la fuerza ascensional;  $V$  es el volumen del globo;  $\rho$  es la densidad del aire;  $\rho_g$  es la densidad del gas; y  $D$  es el diámetro del globo, que se habrá supuesto esférico.

Todas las unidades están expresadas en el Sistema Internacional de Unidades. Para el hidrógeno al nivel del suelo, la flotabilidad  $(\rho - \rho_g)$  es aproximadamente 1,2 kg m<sup>-3</sup>. Todas las magnitudes de la ecuación 8.1 varían con la altura.

La fuerza ascensional libre  $L$  de un globo es la cantidad en que la fuerza ascensional total excede del peso conjunto  $W$  del globo más su carga (si la hubiera):

$$L = T - W \quad (8.2)$$

En otras palabras, es la flotabilidad neta, es decir, el peso adicional que el globo conseguirá soportar, con toda su carga, sin ascender o caer.

Basándose en el principio de similitud dinámica, puede demostrarse que la velocidad de ascenso  $V$  de un globo en el seno de aire inmóvil viene expresada mediante la fórmula general:

$$V = \frac{qL^n}{(L+W)^{1/3}} \quad (8.3)$$

donde  $q$  y  $n$  dependen del coeficiente de resistencia aerodinámica y, por consiguiente, del número de Reynolds,  $v\rho D/\mu$  (donde  $\mu$  es la viscosidad del aire). Lamentablemente, muchos de los globos meteorológicos tienen, en algún momento del vuelo, números de Reynolds comprendidos en la región crítica  $1 \cdot 10^5$  a  $3 \cdot 10^5$ , en que se produce un rápido cambio del coeficiente de resistencia, y no siempre son perfectamente esféricos. Por ello, resulta impracticable utilizar una fórmula simple que sirva para globos de tamaños y fuerzas ascensionales libres diferentes. Así pues, los valores de  $q$  y de  $n$  en la fórmula precedente deben obtenerse experimentalmente; expresando en metros por minuto ( $\text{m min}^{-1}$ ) la velocidad de ascenso, dichos valores suelen ser muy aproximadamente iguales a 150 y a 0,5, respectivamente. Otros factores, como el cambio de densidad del aire o las pérdidas de gas, pueden afectar también a la velocidad de ascenso y causar una variación apreciable con la altura.

Durante la realización de sondeos en condiciones de precipitación o de engelamiento, podría ser necesario un aumento de la fuerza ascensional libre de hasta un 75%, en función del mayor o menor rigor de las condiciones reinantes. Únicamente deberían utilizarse los valores supuestos de la velocidad de ascenso en condiciones de precipitación ligera. Por lo general, solo es necesario conocer con precisión la velocidad de ascenso para las observaciones piloto y de techo de nubes, en que no hay otro medio de determinar la altura. La velocidad de ascenso depende en gran medida de la fuerza ascensional libre y de la resistencia del aire sobre el globo y el tren de lanzamiento. La resistencia aerodinámica puede ser más importante, especialmente en el caso de los globos no esféricos. La altura máxima depende principalmente de la fuerza ascensional y del tamaño y la calidad del globo.

### 8.2.2 Rendimiento de los globos

En el cuadro siguiente se indican valores típicos de las prestaciones que proporcionan distintos tamaños de globos. Se trata de valores muy aproximados. Cuando sea necesario conocer con precisión las prestaciones de determinado globo y de su tren de lanzamiento, habrá que averiguarlas mediante el análisis de vuelos reales. Aumentando la fuerza ascensional total, un globo puede transportar una carga superior a la indicada en el cuadro. Ello se consigue utilizando más gas y aumentando el volumen del globo, con lo cual se modifica la velocidad de ascenso y la altura máxima.

**Prestaciones típicas de un globo**

Peso (g)	10	30	100	200	350	600	1 000	1 500	3 000
Diámetro en el lanzamiento (cm)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Carga útil (g)	0	0	0	250	250	250	250	1 000	1 000
Fuerza ascensional libre (g)	5	60	300	500	600	900	1 100	1 300	1 700
Velocidad de ascenso ( $\text{m min}^{-1}$ )	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Altura máxima (km)	12	13	20	21	26	31	34	34	38

La selección de un globo para fines meteorológicos viene dictada por la carga que haya que transportar, por la velocidad de ascenso, por la altitud requerida, por el propósito de utilizar o no el globo para un seguimiento visual, y por la cubierta de nubes en relación con su color. Normalmente es deseable una velocidad de ascenso de entre 300 y 400  $\text{m min}^{-1}$ , a fin de reducir al mínimo el tiempo requerido para la observación; podría ser también necesaria para proporcionar una aireación suficiente de los sensores de la radiosonda. Al seleccionar un globo habrá que tener también en cuenta que la altitud alcanzada suele ser menor cuando la temperatura es muy baja en el momento del lanzamiento.

En cuanto a los globos que se utilizan para operaciones ordinarias, es conveniente determinar la fuerza ascensional libre que permita alcanzar alturas de estallido óptimas. Por ejemplo, se ha observado que, en algunos globos medianos, una menor cantidad de gas de inflado conlleva una reducción de la velocidad media de ascenso de 390 a 310  $\text{m min}^{-1}$ , lo que puede dar lugar

a un incremento de la altura de explosión en una media de 2 km. Deberían llevarse registros de las alturas de estallido y examinarse periódicamente para asegurar la aplicación de las mejoras prácticas.

En períodos diurnos, las observaciones visuales se facilitan utilizando globos incoloros los días soleados y despejados, y de color oscuro los días nublados.

La mejor manera de calibrar el rendimiento de un globo es determinando la extensión lineal máxima que soportará sin estallar, y puede expresarse de manera práctica mediante el cociente entre el diámetro (o circunferencia) en el momento de estallar y el diámetro del globo no inflado. El rendimiento de un globo durante el vuelo, sin embargo, no es necesariamente el mismo que en una prueba de estallido efectuada en tierra. El rendimiento puede resultar afectado por un trato rudo durante el inflado y por los esfuerzos provocados durante un lanzamiento en condiciones de viento fuerte. Durante el vuelo, la extensión del globo puede resultar afectada por la pérdida de elasticidad a bajas temperaturas, por la acción química del oxígeno, del ozono o de la radiación ultravioleta, y por defectos de fabricación, como pinchazos o puntos débiles. Con todo, un globo de calidad satisfactoria debería extenderse al menos hasta el cuádruple durante un sondeo real. El grosor del material en el momento del lanzamiento suele ser de 0,1 a 0,2 mm.

Durante el ascenso, se produce siempre un ligero exceso de presión,  $p_1$ , de algunos hectopascales en el interior del globo, debido a la tensión del caucho. Ello impone un límite a la presión externa que es posible alcanzar. Puede demostrarse que, si la temperatura es la misma en el interior que en el exterior del globo, la presión limitadora  $p$  viene dada por:

$$p = \left( \frac{1,07W}{L_0} + 0,075 \right) p_1 \cong \frac{Wp_1}{L_0} \quad (8.4)$$

donde  $W$  es el peso del globo más los aparatos, y  $L_0$  es la fuerza ascensional libre en tierra, expresados ambos en gramos. Si el globo es capaz de alcanzar la altura correspondiente a  $p$ , flotará a esa altura.

### 8.3 MANEJO DE LOS GLOBOS

#### 8.3.1 Almacenamiento

Es muy importante que los globos de radiosonda se almacenen correctamente si se desea obtener de ellos un rendimiento óptimo al cabo de varios meses. Es aconsejable reducir las existencias de globos a la cantidad mínima que permitan las necesidades operativas dentro de los márgenes de seguridad. Siempre que sea posible, será preferible recibir material con frecuencia antes que comprar en grandes cantidades, con los consecuentes largos períodos de almacenamiento. Para evitar utilizar globos que hayan estado almacenados durante mucho tiempo, deberían utilizarse siempre siguiendo el orden determinado por su fecha de fabricación.

Normalmente es posible obtener el rendimiento máximo hasta unos 18 meses después de la fabricación, siempre y cuando las condiciones de almacenamiento hayan sido cuidadosamente determinadas. Muchos fabricantes publican instrucciones para sus propios globos, que habría que observar meticulosamente. Las instrucciones generales siguientes son aplicables a la mayoría de los tipos de globos de radiosonda.

Los globos deberían almacenarse al abrigo de la luz del sol y, a ser posible, en la oscuridad. En ningún momento deberían almacenarse junto a una fuente de calor o de ozono. Los globos compuestos de policloropreno o de una mezcla de policloropreno y caucho natural pueden deteriorarse si se exponen al ozono emitido por generadores eléctricos o por motores de grandes dimensiones. Todos los globos deberían mantenerse en su embalaje original hasta que comiencen los preparativos del vuelo. Habría que poner cuidado para que no entren en contacto con sustancias oleosas o de otro tipo que pudieran penetrar en la envoltura y dañar el globo.

Siempre que sea posible, los globos deberían guardarse en un recinto a temperaturas de entre 15 °C y 25 °C; algunos fabricantes proponen directrices concretas sobre este particular, que habría que seguir en todos los casos.

### 8.3.2 **Acondicionamiento**

Los globos de caucho natural no requieren un tratamiento térmico especial previo a su uso, ya que ese material no se congela a las temperaturas habituales de los edificios destinados a viviendas. Sin embargo, si un globo ha estado almacenado a una temperatura inferior a 10 °C durante un largo período, es preferible tenerlo a la temperatura ambiente durante varias semanas antes de utilizarlo.

Los globos de policloropreno experimentan una pérdida parcial de elasticidad durante el almacenamiento prolongado a temperaturas inferiores a 10 °C. Para obtener un resultado óptimo, habría que recuperar dicha pérdida antes del inflado mediante una preparación del globo. Convendría atenerse a las instrucciones del fabricante. Lo habitual es colocar el globo en una cámara aislada térmicamente con circulación forzada de aire, mantenerlo a temperatura y humedad adecuadas durante algunos días antes de inflarlo, o sumergirlo en un baño de agua templada.

En las estaciones polares, durante períodos extremadamente fríos, los globos que se utilicen deberían tener unas características especiales, de modo que puedan mantener la resistencia y la elasticidad en tales condiciones.

### 8.3.3 **Inflado**

Cuando no se utilice un lanzador de globos, convendría disponer de un recinto especial, preferiblemente aislado de otros edificios, para el llenado de los globos. El recinto debería estar adecuadamente ventilado (por ejemplo, National Fire Protection Association (NFPA), 1999). Si se va a utilizar hidrógeno gaseoso, será esencial respetar las precauciones de seguridad (véase la sección 8.6). El edificio no debería contener ninguna fuente de chispas, y sería preciso que todos los interruptores y dispositivos eléctricos estén diseñados de manera que no las produzcan; en la sección 8.6.2 se dan más indicaciones al respecto. Si se va a usar helio gaseoso, habrá que prever la posibilidad de calentar el edificio en tiempo frío. Las paredes, las puertas y los suelos tendrían que disponer de buenos acabados, y deberían estar libres de polvo y de partículas finas. El calentamiento de los recintos de inflado con hidrógeno puede conseguirse mediante vapor, agua caliente u otros métodos indirectos; sin embargo, el calentamiento eléctrico, si se utilizase, deberá cumplir las normativas eléctricas nacionales (por ejemplo, NFPA 50A para espacios de clase I y división 2).

Durante el inflado convendría usar vestimentas de protección (véase la sección 8.6.4). El operario no debería permanecer en una habitación cerrada con un globo que contenga hidrógeno. El proceso de suministro del hidrógeno debería estar controlado, y la operación de llenado tendría que observarse desde el exterior si las puertas están cerradas; estas deberían permanecer abiertas mientras el operario se encuentre en el recinto con el globo.

El inflado debería realizarse lentamente, ya que toda expansión súbita podría crear puntos débiles en el material del globo. Sería deseable disponer de una válvula de ajuste fino para regular el flujo del gas. El nivel de inflado deseado (fuerza ascensional libre) puede determinarse utilizando una boquilla de llenado, del peso requerido, o una boquilla que forme un brazo de balanza, en el que pueda pesarse la fuerza ascensional del globo. Este último método es menos conveniente, a menos que se desee un margen de variación en el peso de los globos, que es prácticamente innecesario en el régimen de trabajo habitual. Es útil disponer de una válvula acoplada al inflador de balanza; un sistema más depurado, utilizado en algunos servicios, consiste en una válvula ajustable de modo que se cierre automáticamente al alcanzarse la fuerza ascensional adecuada.

### 8.3.4 Lanzamiento

El globo debería mantenerse al abrigo hasta que todo esté listo para el lanzamiento. Convendría evitar una exposición prolongada a la luz solar intensa, que podría causar un rápido deterioro del material del globo, o incluso hacerlo estallar antes de iniciar el ascenso. En los lanzamientos manuales se debería vestir prendas de protección.

El lanzamiento de un globo de radiosonda con viento ligero no reviste especial dificultad. Habría que tener cuidado siempre en evitar que el globo y los instrumentos tropiecen con obstáculos antes de elevarse por encima de los árboles y edificios que rodean la estación. Una gran parte de los problemas del lanzamiento puede evitarse planificando detenidamente el lugar en que se va a efectuar. El área seleccionada debería tener el mínimo posible de obstáculos que puedan interferir en el lanzamiento; los edificios de la estación deberían estar diseñados y ubicados atendiendo a los vientos predominantes, a los efectos probables de las ráfagas en el área de lanzamiento y, en climas fríos, a las ventiscas de nieve.

Es también aconsejable, con vientos fuertes, mantener la amarra de suspensión del instrumento lo más corta posible durante el lanzamiento, utilizando una trabilla de suspensión o un devanador. Un dispositivo útil sería un carrete que enrolle la cuerda de suspensión, junto con un perno provisto de un freno de aire o de una trabilla que permita ir devanando lentamente la cuerda tras el lanzamiento del globo.

Los lanzadores mecánicos de globos tienen la gran ventaja de haber sido diseñados para proporcionar una seguridad prácticamente total, ya que mantienen separado al operario del globo durante el llenado y el lanzamiento. Pueden ser automatizados en grado diverso, incluso hasta el punto de realizarse toda la operación de radiosonda sin la presencia de un operario en caso necesario. Estos dispositivos podrían no ser efectivos a velocidades del viento superiores a  $20 \text{ m s}^{-1}$ . Convendrá prever una ventilación adecuada para los sensores de la radiosonda antes del lanzamiento, y sería deseable que la estructura estuviera construida de manera que no resultara dañada por el fuego o por las explosiones.

## 8.4 ACCESORIOS PARA ASCENSOS DE GLOBOS

### 8.4.1 Iluminación para ascensos nocturnos

La fuente de luz habitualmente utilizada en los ascensos nocturnos de los globos piloto es una lámpara con una pequeña batería eléctrica. Suele ser adecuada una batería de dos celdas de 1,5 V, o bien una de activación por agua con una bombilla de 2,5 V y 0,3 A. Otra posibilidad es utilizar un dispositivo de iluminación por fluorescencia química. No obstante, para sondeos de gran altitud se necesita un sistema más potente, de 2 a 3 W, junto con un reflector simple.

Si se desea que la velocidad de ascenso se mantenga invariable cuando se utilice un dispositivo de iluminación, en teoría se requerirá un pequeño aumento de la fuerza ascensional libre; es decir, la fuerza ascensional total deberá aumentar en una cantidad superior al peso adicional transportado (véase la ecuación 8.3). En la práctica, sin embargo, el aumento requerido es probablemente menor que el calculado, ya que la carga mejora el perfil aerodinámico y la estabilidad del globo.

Tiempo atrás, se utilizaba para los ascensos nocturnos una pequeña vela alojada en un farol de papel translúcido suspendido a unos 2 m por debajo del globo. Aun así, hay riesgo de deflagración o de explosión si la vela llega a aproximarse al globo o a la fuente de hidrógeno, además del riesgo de originar un incendio forestal u otro incendio grave al retornar a la tierra. Por ello, no es en absoluto recomendable utilizar velas.

### 8.4.2 Paracaídas

Para reducir el riesgo de causar daños con la caída de un instrumento de sondeo, es habitual instalar un paracaídas simple. Este debería poder abrirse con fiabilidad, y reducir la velocidad de descenso a no más de  $5 \text{ m s}^{-1}$  en las proximidades del suelo. Convendría también que sea resistente al agua. Para instrumentos de hasta 2 kg de peso, será suficiente un paracaídas de papel impermeable o de plástico, de unos 2 m de diámetro, y de una longitud de cordaje de unos 3 m. Para reducir la tendencia del cordaje a retorcerse durante el vuelo es aconsejable fijar las cuerdas a un aro ligero de madera, plástico o metal, de unos 40 cm de diámetro, inmediatamente por encima del punto en que se enlazan.

Cuando el tren de lanzamiento incorpora un reflector de radar para la detección de vientos, podrá instalarse este en el paracaídas, y servirá además para mantener las cuerdas separadas. Las cuerdas y los accesorios deberán poder resistir la apertura del paracaídas. Si se utilizan radiosondas de poco peso (menos de 250 g), el reflector de radar podría proporcionar suficiente resistencia por sí solo durante el descenso.

## 8.5 GASES DE INFLADO

### 8.5.1 Generalidades

Los dos gases más adecuados para los globos meteorológicos son el helio y el hidrógeno. El primero resulta más preferible, ya que no presenta riesgos de explosión ni de incendio. Sin embargo, son pocos los países que disponen de un suministro natural abundante, por lo que se utiliza más el hidrógeno (véase Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1982). La flotabilidad (la fuerza ascensional total) del helio es de  $1,115 \text{ kg m}^{-3}$  a una presión de 1 013 hPa y a una temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . El valor correspondiente para el hidrógeno puro es de  $1,203 \text{ kg m}^{-3}$ , y para el hidrógeno comercial, un poco más bajo.

Cabe señalar que la utilización de hidrógeno a bordo de buques ya no está permitida en las condiciones generales de las pólizas de seguro marítimo. Deberá sopesarse el costo adicional que supondría la utilización de helio, frente a los riesgos para la vida humana y el costo extra del seguro, si fuera posible concertar uno.

Además del costo y de los problemas de transporte, el suministro en bombonas de gas comprimido constituye el medio de abastecimiento de gas más conveniente en las estaciones meteorológicas. Sin embargo, cuando el costo o la dificultad de suministrar bombonas sea un impedimento, la utilización de un generador de hidrógeno en la estación (véase la sección 8.5.3) no debería presentar grandes dificultades.

### 8.5.2 Bombonas de gas

Para usos generales, las bombonas de acero, con una capacidad de  $6 \text{ m}^3$  de gas comprimido a una presión de 18 MPa (10 MPa en los trópicos), tienen probablemente el tamaño más conveniente. Sin embargo, cuando el consumo de gas es alto, como ocurre en las estaciones de radiosonda, puede ser útil emplear bombonas de mayor capacidad, o baterías de bombonas estándar conectadas a una misma válvula de salida. Esta forma de colocación reducirá al mínimo las operaciones del personal. Para evitar el riesgo de confusión con otros gases, las bombonas de hidrógeno deberían estar pintadas de un color distintivo (en muchos países se usa el rojo), y estar marcadas además conforme a las normativas nacionales. Sus válvulas de salida deberían estar enroscadas a la izquierda, para diferenciarlas de las de las bombonas de gases no combustibles. Las bombonas tendrían que estar provistas de un capuchón, para proteger las válvulas durante los desplazamientos.

Convendría probar las bombonas de gas a intervalos regulares de dos a cinco años, en función del tipo de reglamentación nacional vigente. Para efectuar la prueba, habría que someterlas a una presión interna al menos un 50% superior a su presión de funcionamiento normal.



Las bombonas de hidrógeno no deberían exponerse al calor y, en climas tropicales, deberían estar protegidas de la luz solar directa. Preferiblemente, tendrían que almacenarse en un lugar cerrado, bien ventilado, que permita salir al exterior los escapes de gas que se produzcan.

### 8.5.3 Generadores de hidrógeno

El hidrógeno puede producirse *in situ* mediante diversos tipos de generadores. Todas las plantas generadoras e instalaciones de almacenamiento de hidrógeno deberán estar claramente marcadas y llevarán las advertencias adecuadas conforme a las reglamentaciones nacionales (por ejemplo, "Esta unidad contiene hidrógeno"; "Hidrógeno: Gas inflamable. Prohibido fumar. No generar llamas al aire libre"). Los procesos siguientes han resultado los más adecuados para generar hidrógeno con fines meteorológicos:

- a) ferrosilicio y sosa cáustica con agua;
- b) aluminio y sosa cáustica con agua;
- c) hidruro de calcio y agua;
- d) pastillas de magnesio-hierro y agua;
- e) amoníaco líquido con catalizador de platino caliente;
- f) metanol y agua con un catalizador caliente;
- g) electrólisis de agua.

La mayoría de las sustancias químicas empleadas en estos procesos son peligrosas, y habría que atenerse estrictamente a las normas nacionales pertinentes y a los códigos de aplicación de dichas normas, incluidos el marcado y las advertencias. Esas sustancias requieren un transporte, almacenamiento, manipulación y evacuación especiales. Muchas de ellas son corrosivas, al igual que el residuo resultante de su utilización. Si no se controlaran cuidadosamente esas reacciones, podrían producir un exceso de calor y de presión. El metanol, que es un alcohol tóxico, puede ser mortal si se ingiere o si se abusa de esa sustancia mediante una exposición excesiva.

En particular, la sosa cáustica, que es de uso común, requiere un manejo cuidadoso por parte del operario, que debería protegerse adecuadamente, especialmente en los ojos, no solo del contacto con la solución, sino también de las finas partículas que podrían desprenderse al colocar el material sólido en el generador. En previsión de accidentes, convendría tener a mano un frasco de colirio para el lavado de los ojos y un agente neutralizador (por ejemplo, vinagre).

Algunos de estos métodos químicos tienen lugar a alta presión, con el consiguiente aumento del riesgo de accidente. Convendría probar los generadores de alta presión cada dos años, como mínimo al doble de la presión de funcionamiento. Los generadores deberían estar provistos de un dispositivo de seguridad que alivie el exceso de presión. Este suele consistir en un disco de ruptura, y es muy importante atenerse estrictamente a las instrucciones de uso en lo referente al material, tamaño y forma de los discos y a la frecuencia de recambio. Aunque el dispositivo de seguridad sea eficiente, es previsible que durante su funcionamiento expulse solución caliente. Deberán limpiarse cuidadosamente los generadores de alta presión antes de recargarlos, dado que los restos de la carga anterior podrían reducir considerablemente el volumen disponible del generador y aumentar, por consiguiente, la presión de funcionamiento por encima del límite de diseño.

Por desgracia, el hidruro de calcio y el magnesio-hierro, que permiten evitar la utilización de sosa cáustica, son caros de producir, por lo que probablemente solo serán aceptables para fines especiales. Dado que estos dos materiales producen hidrógeno a partir de agua, es esencial almacenarlos en contenedores absolutamente a prueba de humedad. En los procesos en que se utilice un catalizador, se pondrá buen cuidado en evitar la contaminación del catalizador.

Todos los sistemas producen gas a una presión suficiente para llenar globos. Sin embargo, las tasas de producción de algunos de ellos (en particular, la electrólisis), son demasiado bajas, por lo que habría que producir el gas antes de necesitarlo, y almacenarlo en forma comprimida o en un gasómetro.

Los procesos que funcionan mediante electrólisis de agua o mediante la desintegración catalítica de metanol son atractivos por su relativa seguridad y su bajo costo, y por utilizar materiales no corrosivos. Tanto estos dos procesos como el de amoníaco líquido requieren la utilización de energía eléctrica. El equipo es más bien complejo, y deberá estar sometido a un cuidadoso mantenimiento y, diariamente, a procedimientos de comprobación detallados, para asegurarse de que los sistemas de control de seguridad son efectivos. El agua destinada a la electrólisis deberá tener un bajo contenido en minerales.

## 8.6 UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO Y PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

### 8.6.1 Generalidades

El hidrógeno puede entrar fácilmente en ignición mediante una pequeña chispa, y arde con una llama casi invisible. Puede también arder mezclado con el aire a muy diversas concentraciones, entre el 4% y el 74% en volumen (NFPA, 1999), y explotar a concentraciones del 18% al 59%. En ambos casos, un operario cercano puede sufrir quemaduras graves en toda la piel expuesta, y una explosión puede lanzar a una persona contra una pared o derribarla, causándole heridas graves.

El riesgo de accidente puede eliminarse mediante procedimientos y equipamientos cuidadosamente diseñados, siempre y cuando se respeten aquellos y se mantengan estos con diligencia (Gremia, 1977; Ludtke y Saraduke, 1992; Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, 1968). La incorporación de medios de seguridad adecuados para los edificios en los que se genera y almacena hidrógeno, o para los lugares en que se llenan o lanzan los globos, no siempre es objeto de la atención adecuada (véase la sección siguiente). En particular, deberá someterse a vigilancia e inspección meticolosas y continuas la observancia de los procedimientos por los operarios.

Las ventajas de los lanzadores automáticos de globos (véase la sección 8.3.4) es que pueden llegar a tener un grado de seguridad casi total y que pueden prevenirse las lesiones de los operarios al mantener a estos separados del hidrógeno.

Un punto de partida esencial para conocer las precauciones de seguridad consistirá en aplicar las normas y reglas de utilización concebidas para evitar los riesgos que conllevan las atmósferas explosivas en general. Se encontrará mayor información sobre las precauciones necesarias en las publicaciones sobre los riesgos de explosión en las salas de operaciones de los hospitales y en otros entornos industriales en que existan problemas similares. El operario no debería permanecer nunca en un recinto cerrado con un globo inflado. A lo largo de este capítulo se encontrarán otras indicaciones sobre seguridad.

### 8.6.2 Diseño de edificios

Debería disponerse lo necesario para evitar la acumulación de hidrógeno libre y de cargas estáticas, y la aparición de chispas en todo recinto en que se genere, almacene o utilice hidrógeno. Deberá evitarse la acumulación de hidrógeno incluso en caso de que estallara un globo en el interior del recinto durante el proceso de inflado (OMM, 1982).

El diseño estructural de los edificios en que se opere con hidrógeno deberá incorporar disposiciones de seguridad (NFPA, 1999; Standards Association of Australia, 1985). Las condiciones climáticas y las normas y códigos nacionales establecen un margen de limitación dentro del cual pueden definirse muchos tipos de diseños y materiales apropiados para esa clase de edificios. Los códigos tienen únicamente carácter de recomendación, y sirven como base

para adoptar unas prácticas adecuadas. Las normas se publican en forma de especificaciones para materiales, productos y prácticas de seguridad en el trabajo. Deberían referirse a aspectos tales como accesorios de iluminación eléctrica que no produzcan llamas, aparatos eléctricos en atmósferas explosivas, ventilación de recintos con atmósferas explosivas, utilización de ventanas de plástico, discos de ruptura, etc. (OMM, 1982).

Tanto los códigos como las normas deberían contener información útil y adecuada para el diseño de edificios en que se trabaje con hidrógeno además de estar en consonancia con las prácticas nacionales recomendadas. Cuando se diseñen edificios de este tipo, o cuando se reexamine la seguridad de un edificio existente, convendría solicitar directrices de las autoridades nacionales de normalización, en particular para aspectos tales como:

- a) ubicaciones preferidas para los sistemas de hidrógeno;
- b) resistencia de los materiales propuestos contra incendios, en relación con los valores que haya que cumplir;
- c) necesidades de ventilación, y en particular techos de construcción ligera para que el hidrógeno y los productos de las explosiones escapen desde el punto más alto del edificio;
- d) equipo y cableado eléctrico adecuados;
- e) protección contra incendios (extintores y alarmas);
- f) disposiciones para que el operario controle el inflado del globo desde el exterior del recinto de llenado.

Convendría adoptar medidas para reducir al mínimo la posibilidad de que se produzcan chispas en los recintos en que se maneje hidrógeno. Por lo tanto, debería mantenerse fuera de los recintos todo tipo de sistemas eléctricos (interruptores, tomas, cables); en caso contrario, habría que instalar interruptores especiales a prueba de chispas, presurizados para evitar la penetración de hidrógeno, así como cables de esas mismas características. Es también aconsejable iluminar los recintos mediante luces exteriores a través de ventanas. Por esas mismas razones, ningún instrumento de los que se utilicen debería producir chispas. El calzado del observador tampoco debería producir chispas, y habría que instalar asimismo una protección adecuada contra rayos.

Si en alguna parte del edificio se utilizan sistemas de aspersion, habría que tener presente la posibilidad de que siga escapando hidrógeno aun después de haber extinguido el fuego. Existen sistemas de detección de hidrógeno que pueden utilizarse, por ejemplo, desconectar la corriente al generador de hidrógeno si llegase a un 20% del límite inferior de explosión, y que activarían una alarma, más una alarma subsiguiente que se activaría a un 40% de dicho límite.

Convendría delimitar una zona de emergencia en torno a un área que abarque el generador, el almacén y el globo, y a la que solo estaría permitido el acceso con vestimenta de seguridad (véase la sección 8.6.4).

Los lanzadores de globos (véase la sección 8.3.4) hacen normalmente innecesario un recinto especial para el llenado del globo, y simplifican mucho el diseño de las instalaciones para uso de hidrógeno.

### 8.6.3 Cargas estáticas

Los peligros que conlleva el inflado y el lanzamiento de los globos pueden reducirse considerablemente evitando la presencia de cargas estáticas en el recinto de llenado, en la ropa del observador y en el propio globo. En Loeb (1958) se encontrará información sobre el proceso de electrificación estática. Las cargas estáticas se controlan mediante una buena toma de tierra de los equipos de hidrógeno y de los accesorios del recinto de llenado. La utilización de tenazas para descarga estática por los observadores puede eliminar las cargas generadas en las prendas de vestir (OMM, 1982).

En los globos, las cargas eléctricas son más difíciles de tratar. El material del globo, especialmente el látex puro, es un aislante excelente. Se generan cargas estáticas al separar dos materiales aislantes en contacto entre sí. Un breve contacto con las ropas o el cabello del observador puede generar una carga de 20 kV, que, si se descarga a través de una chispa, es más que suficiente para deflagrar una mezcla de aire e hidrógeno. Las cargas acumuladas en un globo pueden tardar muchas horas en descargarse a tierra a través del material del globo, o de manera natural al aire circundante. Se ha determinado también que, cuando un globo estalla, la separación de la lámina a lo largo de una hendidura en el material puede generar chispas con energía suficiente para desencadenar la ignición.

Las cargas electrostáticas pueden evitarse o eliminarse rociando agua sobre el globo durante el llenado, sumergiéndolo en una solución antiestática (secándolo o no antes de su utilización), utilizando globos con aditivos antiestáticos en el látex, o insuflando aire ionizado sobre el globo. No bastará con conectar a tierra el cuello del globo.

El potencial electrostático máximo que se puede generar o mantener en la superficie de un globo disminuye al aumentar la humedad, pero la magnitud de este efecto no se conoce aún con exactitud. Ciertas pruebas realizadas con globos de 20 g inflados indican que es poco probable que se produzcan chispas con la energía suficiente para deflagrar mezclas hidrógeno-oxígeno cuando la humedad relativa del aire es superior al 60%. Otros estudios cifran el límite de seguridad en valores de humedad relativa de entre el 50% y el 76%, pero hay algunos que indican que pueden producirse chispas a niveles de humedad relativa todavía más altos. Se podría decir que una descarga estática es poco probable cuando la humedad relativa excede del 70%, pero sería mejor no fiarse de esta afirmación (véase Cleves y otros, 1971).

Se recomienda sin reservas rociar el globo con finas gotas de agua, ya que el humedecimiento y la toma de tierra eliminarán la mayor parte de las cargas estáticas de las partes mojadas. La aspersión debería hacerse de modo que moje la mayor superficie de globo posible, produciendo regueros continuos de agua desde el globo hasta el suelo. Si se mantienen cerradas las puertas, la humedad relativa en el interior del recinto de llenado puede aumentar hasta el 75% o más, reduciendo así la probabilidad de que salten chispas con energía suficiente para producir una ignición. El lanzamiento del globo debería realizarse rápidamente, una vez que concluya la aspersión y se abran las puertas del recinto de llenado.

Otras medidas que se deberían adoptar para reducir la formación de cargas estáticas son (OMM, 1982):

- a) dotar al edificio de un sistema completo de tomas a tierra, conectando por separado a una sola tierra todos los accesorios, el equipo de hidrógeno y el pararrayos, de modo que dicha tierra cumpla las especificaciones nacionales vigentes para los electrodos de tierra; se debería contemplar la posibilidad de extraer las cargas eléctricas desde el suelo;
- b) instalar puntos de descarga estática para los observadores;
- c) revestir regularmente las ventanas con una solución antiestática;
- d) sugerir a los operarios que no lleven puestas prendas de vestir sintéticas o zapatos aislantes; es una buena costumbre proporcionar un calzado parcialmente conductor;
- e) reducir al mínimo todo contacto entre el observador y el globo; esto se podría facilitar situando el dispositivo de llenado a 1 m o más por encima del suelo.

#### 8.6.4 **Vestimenta de protección e instalaciones de primeros auxilios**

Convendría llevar puestas prendas de protección siempre que se trabaje con hidrógeno, durante todas las etapas de las operaciones, y concretamente durante la generación del gas, el manejo de las bombonas, el inflado y el lanzamiento del globo. Estas prendas consistirán en una bata

ligera de material ignífugo, con capucha de material antiestático y no sintético, y protección para la parte inferior de la cara, gafas o anteojos, guantes de algodón, y cualquier otra prenda contra deflagraciones recomendada localmente (véase Hoschke y otros, 1979).

Debería disponerse de material de primeros auxilios adecuado en la instalación, por ejemplo contra las quemaduras producidas por deflagraciones y para los miembros rotos. Cuando se utilicen sustancias químicas, convendría tener a mano soluciones neutralizantes apropiadas, por ejemplo ácido cítrico para las quemaduras de sosa cáustica. Sería preciso disponer de un dispositivo para el lavado ocular, listo para su uso (OMM, 1982).

---

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, 1968: *Hydrogen Safety Manual*. Memorando técnico de la NASA TM-X-52454, Centro de Investigación de la NASA en Lewis, Estados Unidos.
- Cleves, A. C., J. F. Sumner y R. M. H. Wyatt, 1971: "The Effect of Temperature and Relative Humidity on the Accumulation of Electrostatic Charges on Fabrics and Primary Explosives", en *Proceedings of the Third Conference on Static Electrification*. Londres.
- Gremia, J. O., 1977: *A Safety Study of Hydrogen Balloon Inflation Operations and Facilities of the National Weather Service*. Trident Engineering Associates, Annapolis, Maryland.
- Hoschke, B. N. y otros, 1979: *Report to the Bureau of Meteorology on Protection Against the Burn Hazard from Exploding Hydrogen-filled Meteorological Balloons*. División de la CSIRO de Física Textil y Departamento de Vivienda y Construcción, Australia.
- Loeb, L. B., 1958: *Static Electrification*. Springer-Verlag, Berlín.
- Ludtke, P. y G. Saraduke, 1992: *Hydrogen Gas Safety Study Conducted at the National Weather Service Forecast Office*. Norman, Oklahoma.
- National Fire Protection Association, 1999: *NFPA 50A: Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- , 2002: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*. National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, Maryland.
- , 2005: *NFPA 70, National Electrical Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- , 2006: *NFPA 220, Standard on Types of Building Construction*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- Organización Meteorológica Mundial, 1982: *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*. Informe N° 13 sobre instrumentos y métodos de observación. Ginebra.
- Rosen, B., V. H. Dayan y R. L. Proffit, 1970: *Hydrogen Leak and Fire Detection: A Survey*. NASA SP-5092.
- Servicio del Medio Ambiente Atmosférico (Canadá), 1978: *The Use of Hydrogen for Meteorological Purposes in the Canadian Atmospheric Environment Service*. Toronto.
- Standards Association of Australia, 1970: *AS C99: Electrical equipment for explosive atmospheres – Flameproof electric lightning fittings*.
- , 1980: *AS 1829: Intrinsically safe electrical apparatus for explosive atmospheres*.
- , 1985: *AS 1482: Electrical equipment for explosive atmospheres – Protection by ventilation – Type of protection V*.
- , 1995: *ASNZS 1020: The control of undesirable static electricity*.
- , 2004: *AS 1358: Bursting discs and bursting disc devices – Application selection and installation*.
-