

Sistemas de sostenimiento vital de los laboratorios orbitales

ALFREDO ROSADO BARTOLOMÉ

SE da el nombre de Sistemas de Sostenimiento Vital (S.S.V.) al conjunto de dispositivos que hacen habitable un vehículo espacial mediante el mantenimiento y control continuos de sus parámetros ambientales. Incluye también el suministro de agua potable y alimentos, así como los medios higiénico-sanitarios y eliminación de residuos.

Aquí sólo nos ocuparemos del primero de tales aspectos en relación con los laboratorios orbitales "Skylab" de los EE.UU. y "Mir" de la C.E.I., cuyas características esenciales se recogen en la tabla I (1,2).

LIMITES FISIOLÓGICOS AMBIENTALES

La presión parcial de oxígeno (P_{O_2}) al nivel del mar es de unos 160 m.m.Hg. En los pulmones, los componentes atmosféricos se diluyen con la adición de vapor de agua y dióxido de carbono, de modo que en los alvéolos la presión parcial de oxígeno (P_{aO_2}) es de 104 m.m.Hg.

Por otra parte, el valor mínimo no hipóxico de la P_{O_2} depende del gra-

do de aclimatación del sujeto. En individuos no aclimatados las primeras manifestaciones detectables de hipoxia (deterioro de la visión cromática) aparecen con valores de P_{O_2} equivalentes a los hallados a 1.500 metros de altitud. Es decir, podemos establecer un valor mínimo aceptable de la P_{O_2} en aproximadamente 130 m.m.Hg (P_{aO_2} de 80 m.m.Hg).

El consumo de oxígeno es modificado por el ejercicio físico de forma que los pulmones pueden transferir a la sangre hasta 6 litros por minuto en condiciones de esfuerzo máximo, mientras este valor queda reducido a 200-400 ml./min. en reposo, es decir, varía en un factor de veinte.

El consumo diario de un hombre es de alrededor de 1 kg. de oxígeno. Una persona activa requiere unos 600 litros de oxígeno al día. Por lo tanto, el suministro de oxígeno de un vehículo espacial debe garantizar unos márgenes que den cabida a tales necesidades variables. Además, dicho sistema puede sufrir variaciones en su rendimiento -sobre todo en misiones de larga duración- que

no deben comprometer la supervivencia de los tripulantes.

No obstante, la citada P_{O_2} también se puede obtener con una presión barométrica total reducida, incrementando la proporción de oxígeno en la mezcla de gases.

En la atmósfera cerrada de un vehículo espacial, el control de los contaminantes ambientales adquiere la mayor importancia. La tabla II (3) muestra los principales agrupados según su origen, citándose sólo los más abundantes o característicos, ya que han sido identificados numerosísimos (4).

El más abundante es el dióxido de carbono. En reposo cada tripulante produce unos 400 litros al día y el esfuerzo físico puede elevar notablemente esta cifra. Sus efectos nocivos dependen de la concentración y duración de la exposición a este gas. Las consecuencias de una exposición de tipo agudo consisten en taquicardia, taquipnea e incremento del volumen minuto. La exposición prolongada ocasionará alteraciones del equilibrio ácido-base del organismo así como pequeños cambios en los parámetros respiratorios.

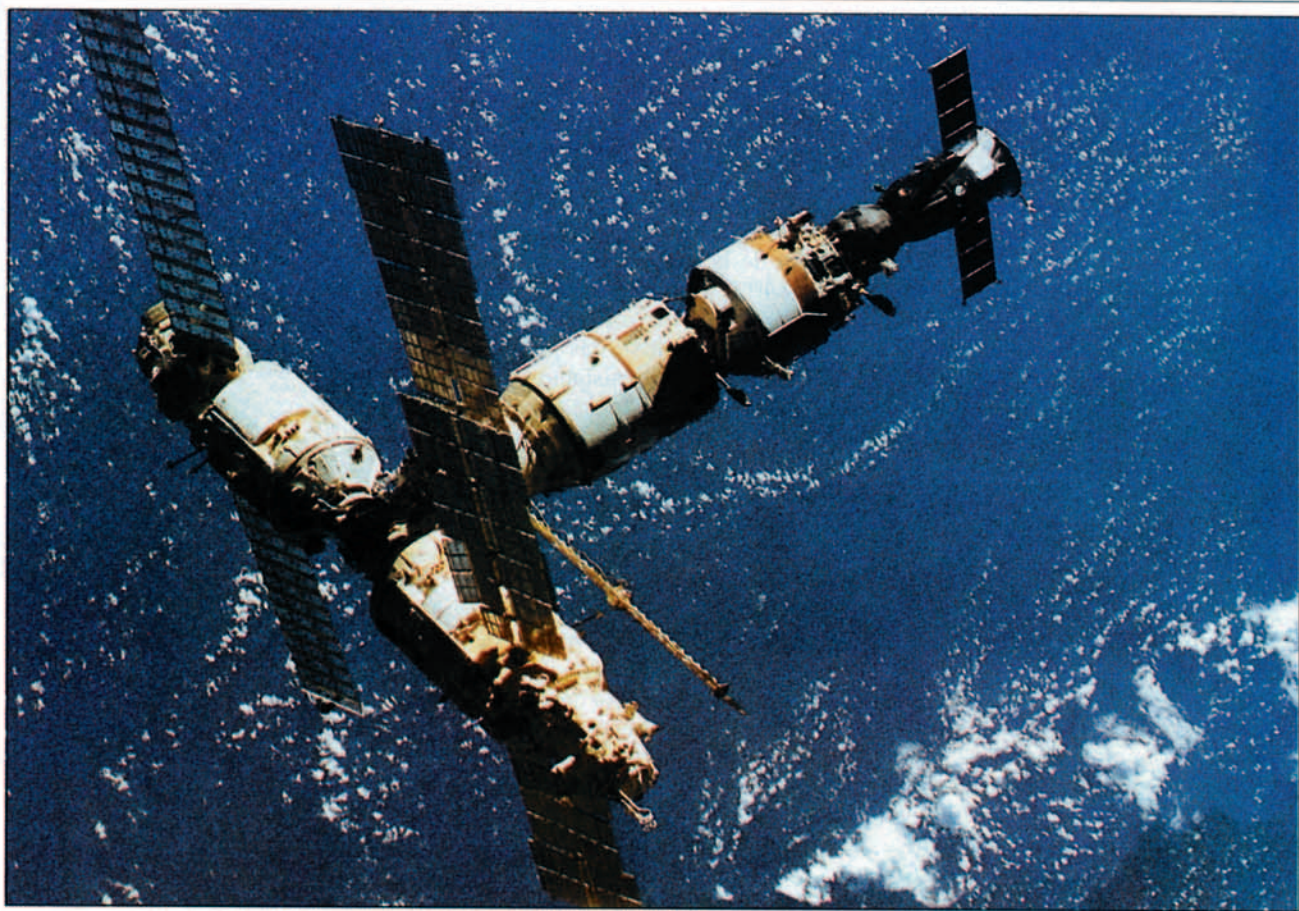
A concentraciones inferiores al 1.5% (presión barométrica total del nivel del mar) no se ha demostrado pérdida alguna de capacidad, si bien aparecen cambios adaptativos que pueden dar lugar a estados patológicos tras exposiciones prolongadas. Por debajo de 0.5% (3.8 m.m.Hg) no se produce adaptación y los cambios fisiológicos son totalmente reversibles (5).

Dado que no existe una concentración mínima fisiológicamente necesaria de dióxido de carbono ambiental, y siendo impracticable eliminar todo el contenido de este gas en la at-

Tabla I
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL LABORATORIO ESPACIAL "SKYLAB" (EE.UU.) Y DEL ACTUAL COMPLEJO ORBITAL "MIR" (C.E.I.). (1, 2)

	SKYLAB	MIR
Masa en órbita (Tm)	86	91
Volumen habitable (m ³)	360	270
Longitud máxima (m)	36	33
Diámetro máximo de los compartimentos habitables (m)	6.5	4.3
Número máxima de vehículos acoplados	2	6
Tiempo total habitada (años)	0.5 (1973-74)	>6.5 (1986-)
Altitud promedio (km)	438	300-400
Inclinación orbital (°)	50	51.6
Periodo orbital (min)	~90	~90

Todos los datos relativos a "Mir" corresponden a la configuración mantenida desde 1990 y hasta la fecha de elaboración de esta tabla (diciembre 1993).



La estación orbital "Mir" en agosto de 1990. Todavía es susceptible de ampliación y el final de su vida útil se estima en 1997.
Foto cortesía D.L.R.

mósfera del vehículo, es preciso establecer un límite para la presión parcial de dióxido de carbono (P_{CO_2}) durante vuelos breves y prolongados. Así pues, aunque la cifra ideal para misiones de larga duración es 0.5%, se puede aceptar un valor máximo de 7.8 m.m.Hg basándonos en la experiencia disponible (4).

Respecto a la presión parcial de vapor de agua (P_{H_2O}), señalamos que es de capital importancia para el balance térmico y el confort de la tripulación. Su magnitud determina la pérdida de agua por transpiración y respiratoria, así como la salud de la piel, mucosas y conjuntiva.

Una P_{H_2O} excesiva tiende a impedir la adecuada transpiración y da lugar a condensación de agua sobre la piel y la ropa. La humedad ambiental demasiado baja ocasionará resaca-

ca y faringe, junto con sequedad de los labios y ojos. En estas condiciones, es de esperar un aumento de infecciones respiratorias.

En suma, desde el punto de vista del confort y la salud, se considera satisfactoria una humedad relativa del aire del 40-60%, equivalente a una P_{H_2O} de 7.5-13 m.m.Hg a 21°C.

La temperatura corporal es cuidadosamente controlada por medio de respuestas fisiológicas automáticas como de comportamientos voluntarios. La capacidad de trabajo puede alterarse considerablemente por el disconfort térmico, cuya apreciación subjetiva es muy variable de unos individuos a otros, aunque la zona de comodidad térmica para un sujeto en reposo se sitúa entre 18 y 25°C.

A su vez, los parámetros ambientales como la humedad y el movimiento del aire también intervienen en la termoregulación. Efectivamente, dentro de la banda de temperaturas aceptables, las variaciones de humedad relativa

Tabla II
Principales contaminantes de la atmósfera de un vehículo espacial agrupados según su procedencia. Modificado de (3)

FUENTE	CONTAMINANTE
1.- Desprendimiento desde materiales no metálicos	Tolueno Metiletilcetona Etilbenceno Isopropil alcohol
2.- Fugas o productos de reacción	Estireno Telururo de cadmio
3.- Fijadores de tejidos biológicos	Glutaraldehído Formaldehído
4.- Combustión incompleta o descomposición térmica de materiales	Monóxido de carbono Cianuro de hidrógeno Partículas de humo
5.- Respiración de los tripulantes	Dióxido de carbono Monóxido de carbono
6.- Metales tóxicos	Vapor de mercurio Vapor o polvo de cadmio
7.- Componentes químicos de dispositivos del vehículo	Freones Amoníaco

del aire tienen poca influencia sobre la sensación de confort. Sin embargo, cuando la temperatura sólo puede mantenerse en el límite máximo aceptable, o éste es rebasado, la humedad adquiere mayor importancia.

Tampoco debe olvidarse que la propia transferencia de calor por convección depende de la presión barométrica, de modo que una atmósfera hipobárica dificultará esa transferencia. Y dado que en micro-gravedad no existe convección espontánea, éste debe ser simulada artificialmente por medio del bombeo continuo de aire, cuya velocidad de circulación influirá en la sensación térmica subjetiva. Así, por ejemplo, la velocidad del aire en "Skylab" era de 12.2 m/min. (1).

TEMPERATURA Y HUMEDAD

La tabla III (6, 7, 8) muestra los parámetros ambientales de "Skylab" y "Mir". La regulación manual de la humedad y temperatura, practicable en ambos laboratorios orbitales, obedece tanto a las necesidades de la tripulación según la actividad física realizada como a preferencias personales, tal como han expresado cosmonautas con experiencia en vuelos de larga duración (9).

En "Skylab", el sistema de control térmico era principalmente de tipo pasivo. El vehículo estaba cuidadosamente recubierto con pinturas de emisividad variable en una disposición específica, de modo que los dispositivos de control térmico activo, tales como radiadores o evaporadores, eran poco necesarios (6). La humedad relativa del aire se mantuvo inferior al 55% (10), siendo los propios astronautas la única fuente de humedad ambiental.

La estación "Mir" utiliza medios de control térmico tanto activos como pasivos. Aunque los diferentes módulos y vehículos de transporte están conectados entre sí mediante tuberías por las que se hace circular el aire constantemente, cada uno de ellos se sirve de sus propios S.S.V., excepto los vehículos "Soyuz TM" y "Progress M", cuyo reducido volumen habitable (10 m³ y 6.6 m³ respectivamente) les permite utilizar los

sistemas del complejo orbital mientras permanezcan acoplados a él.

El sistema de control térmico activo consta de circuitos cerrados de circulación de líquido que alimentan radiadores situados en paneles exteriores de la estación.

Los medios pasivos se basan en el control de la superficie expuesta al sol (el 40% de la estación está permanentemente en sombra) y en la cobertura de sus distintas porciones mediante envolturas aislantes y pinturas de emisividad adecuada.

Los valores de la P_{H₂O} ambiental en "Mir" que muestra la tabla III corresponden a una humedad relativa del aire entre 30 y 70% (11).

En algún caso, los S.S.V. de "Mir" se han mostrado insuficientes, como durante la misión franco-soviética "Aragatz" (1988), en la que por espacio de tres semanas trabajaron seis personas en un volumen habitable de 140 m³, produciéndose excesos de calor y condensación de humedad (12). Es de suponer que las ampliaciones de "Mir" en 1989 y 1990 hayan evitado tales sobrecargas.

SUMINISTRO DE OXIGENO Y DEPURACION DEL AIRE

La atmósfera de un vehículo espacial precisa un suministro continuo de oxígeno y gas diluyente (nitrógeno) para compensar el consumo respiratorio de los tripulantes y las fugas del sistema de presurización.

La peculiar atmósfera de "Skylab" (tabla III) respondía a un compromiso entre requerimientos de diversa índole. Se mantuvo una presión parcial de oxígeno normal a expensas de elevar la proporción de este gas en una atmósfera de baja pre-

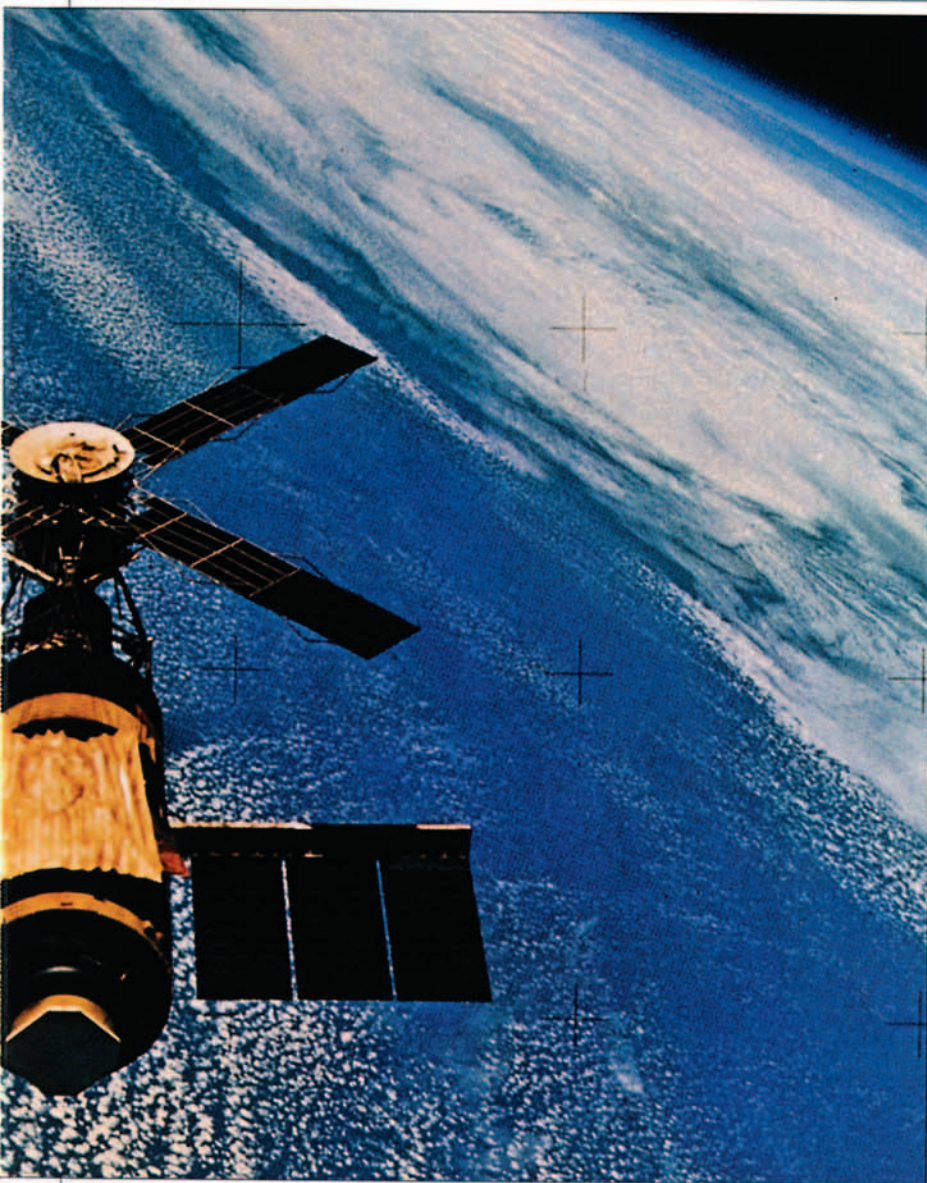


sión, eliminando así la necesidad de desnitrogenación en vuelo antes de las actividades extravehiculares.

"Skylab" contó desde su puesta en órbita con las existencias de oxígeno,

Tabla III
PARAMETROS AMBIENTALES PROMEDIO DE LOS LABORATORIOS ORBITALES "SKYLAB" Y "MIR" (6, 7, 8)

Gases	SKYLAB		MIR	
	Pres. parcial (m.m.Hg)	%	Pres. parcial (m.m.Hg)	%
Nitrógeno	75	28.9	535.7	75.3
Oxígeno	170	65.4	159	22.3
Vapor de agua	10	3.9	9.3	1.3
Dióxido de carbono	5	1.8	8	1.1
Presión barométrica total	260		712	
Banda de temperaturas	15-32°C		18-28°C	



Aspecto que ofrecía el laboratorio espacial "Skylab" a su última tripulación. Febrero de 1974. Foto cortesía NASA.

no y nitrógeno necesarias para las misiones previstas. Disponía de 2.236 kg. de oxígeno y 598 kg. de nitrógeno, ambos en forma gaseosa, almacenados en tanques a 204 atmósferas de presión.

La presión de cabina era controlable desde tierra, aunque la mezcla de gases atmosféricos también podía regularse automáticamente. El nitrógeno era introducido cuando la presión total bajaba de 248.6 m.m.Hg, mientras el oxígeno se inyectaba en el habitáculo si la P_{O_2} se hacía inferior a 191.6 m.m.Hg (1). En la práctica, este control se efectuó a veces de forma manual por los astronautas para mantener una pre-

sión parcial de oxígeno constante durante ciertos experimentos médicos. Mientras "Skylab" estaba deshabitado, la presión barométrica de las zonas habitables podía reducirse a 26 m.m.Hg (10) para minimizar el consumo de los S.S.V. y las fugas de gas al espacio.

"Mir" mantiene las condiciones de cabina habituales en todos los vehículos tripulados soviéticos, análogas a las del nivel del mar (tabla III). Al estar permanentemente habitada, las pérdidas de gases son compensadas por el suministro regular en botellas de alta presión de una mezcla de nitrógeno y oxígeno gaseosos, transportadas por naves

automáticas de reabastecimiento (13). El oxígeno es también regenerado a bordo mediante dos dispositivos de electrólisis de agua, con un rendimiento de 80 litros/hora (14). "Mir" posee asimismo una instalación para transformar por métodos físico-químicos la orina producida por los cosmonautas en oxígeno e hidrógeno gaseosos y en agua potable (7). Además de las citadas reservas de oxígeno embotellado, la estación cuenta con la fuente de oxígeno tradicional de los vehículos soviéticos, en forma de sustancias sólidas que contienen este elemento combinado químicamente (perclorato) (3).

Indudablemente, estos dispositivos generadores reducen las necesidades de reabastecimiento de oxígeno desde la tierra, pero es dudoso que hagan a la estación orbital auto-suficiente en este aspecto.

Para depurar el dióxido de carbono de la atmósfera de los vehículos tripulados se han venido empleando dos métodos. El más antiguo y simple consiste en unidades de absorción mediante hidróxido de litio en las que esta sustancia se combina químicamente con el dióxido de carbono del aire. Por lo tanto, han de ser repuestas a medida que se agotan, al no ser regenerables, de modo que resultan inadecuadas para misiones prolongadas. No obstante, en las estaciones "Salyut" soviéticas -tripuladas hasta 236 días seguidos e intensamente utilizadas- se empleó un método no regenerable para depurar el aire, si bien hay constancia de algún contratiempo en su uso. En una de las misiones a bordo de "Salyut-6" los cosmonautas se quejaban de frecuentes dolores de cabeza. Finalmente, se comprobó que el dióxido de carbono estaba alcanzando niveles peligrosos. El problema fue resuelto cambiando los dispositivos de depuración de aire más a menudo (15).

El segundo procedimiento para depurar el dióxido de carbono fue empleado por vez primera a bordo de "Skylab" y consistía en un sistema regenerable de filtrado molecular que

permitía también eliminar olores y el exceso de humedad ambiental. Consistía de dos lechos reactivos, de modo que mientras uno estaba expuesto a la atmósfera del vehículo, absorbiendo contaminantes, el otro era sometido a calentamiento en el vacío del exterior del laboratorio orbital. Una vez que este lecho había desprendido los gases que portaba, era intercambiado con el del interior de "Skylab". El dispositivo operaba en ciclos de 30 minutos (15 minutos en el vacío y 15 en el interior). Existían a bordo dos de estos filtros moleculares, uno de ellos como reserva. Cada uno contenía dos recipientes de absorbente (zeolitas) y un tercero con carbono activado. El dióxido de carbono y la humedad eran captados por las zeolitas y los olores y otros contaminantes por el carbono activado (1).

Este filtro molecular suponía también un notable ahorro de masa, pues un dispositivo de 15 kg. desempeñaba la función de una unidad de 544 kg. que utilizase hidróxido de litio (16). Una peculiaridad del método era que sólo podía mantener una P_{CO_2} de 5 m.m.Hg que, pese a estar dentro de los márgenes aceptables, superaba el valor de 1 m.m.Hg obtenido con los dispositivos tradicionales no regenerables (6).

A la vista de sus ventajas, sorprende que los soviéticos mantuviesen el sistema clásico en las estaciones "Salyut" hasta la puesta en servicio de "Mir" en 1986, pese a haber superado ya en 1978 los tres meses de máxima permanencia de los estadounidenses a bordo de "Skylab" (1974).

La estación "Mir" dispone de un sistema para depuración del dióxido de carbono basado en absorbentes sólidos regenerables en el vacío que elimina los gases directamente al exterior del vehículo. Posiblemente se trate de un filtro molecular semejante al de "Skylab", aunque coexiste con las unidades tradicionales no regenerables de óxido e hidróxido de litio (13). El contenido de dióxido de carbono tolerado en "Mir" depende de la duración del vuelo, siendo inferior a 8 m.m.Hg para misiones de varios meses y no superior a 6 m.m.Hg en vuelos de corta dura-

ción (7), es decir, durante el periodo de alrededor de una semana en que se solapan la tripulación de relevo y la saliente.

Aparte del dióxido de carbono, los contaminantes que más riesgo suponen, de entre los muchos identificados, son el monóxido de carbono y los hidrocarburos (17).

Los sistemas para depurar estas sustancias consisten en filtros a base de carbono activado a través de los que se hace circular el aire. El carbono presente gran afinidad por numerosos compuestos orgánicos y puede ser también regenerado por calentamiento en el vacío espacial. La mayoría de los contaminantes que aparecen en la tabla II son depurables por calentamiento en el vacío tras ser absorbidos en carbono, si bien algunas sustancias, como el amoníaco y formaldehído requieren el uso de carbono sometido a tratamiento químico especial (3).

Aunque este método sea eficaz para eliminar los hidrocarburos volátiles, resulta inefectivo para deshacerse del monóxido de carbono. Es bien conocida la extrema toxicidad de este gas a causa de su alta afinidad por la hemoglobina, docientas veces superior a la del propio oxígeno. Además, el monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, por lo que puede pasar desapercibido fácilmente, siendo letal a muy bajas concentraciones.

Por lo tanto, el control eficaz de este gas exige técnicas de oxidación catalíticas para transformarlo en dióxido de carbono. Los denominados sistemas oxidantes catalíticos a temperatura ambiente son el método idóneo para eliminar, además del monóxido de carbono, otros muchos contaminantes no depurables por los procedimientos convencionales.

Para eliminar estos microcontaminantes, "Mir" cuenta con absorbentes tanto regenerables como no regenerables basados en carbono activado y agentes catalíticos (13). Hasta la fecha, no hay noticia de que hayan causado problema alguno, a diferencia de los de las antiguas estaciones "Salyut", en las que dejaban bastante que desear. De hecho, en 1976 la tripulación de "Salyut-5" se vio obliga-

da a regresar urgentemente a la tierra por avería de tales dispositivos (18), circunstancia que estuvo a punto de repetirse de nuevo en 1983 a bordo de "Salyut-7" (19) ■

Referencias

- (1). Disher, J.H., Green, W.D. Jr., Belex, L.F. *Astronautics & Aeronautics*. June 1971, 36-49.
- (2). Semenov, Y.P. et al. *Cosmonautics 1991*. Mashinostroenie Press, C.I.S. and Matson Press, USA 1992.
- (3). Coleman, M.E. "Atmospheric Contamination Control" en *Space Station Medical Sciences Concepts*. Mason, J.A., Johnson, P. C. Eds. NASA Technical Memorandum 58255. February 1984; 35-37.
- (4). Horrigan, D.J. "Atmosphere" en *The Physiological Basis for Spacecraft Environmental Limits*. NASA Reference Publication 1045. November 1979; 1-15.
- (5). Waligora, J.M. et al. *Acta Astronautica*. Vol 23, 1991, 171-177.
- (6). Waligora, J.M. et al. "Spacecraft Life Support Systems" en *Space Physiology and Medicine*. Nicogossian, A.E., Huntton, C.L., Pool, S.M. Eds. Second Edition. Lea & Febiger, Philadelphia-London, 1989; 104-120.
- (7). *Mir Orbital Complex. Quant-2 Logistic Supplementary Module*. NPO Energia. Moscow. October 1989.
- (8). Grigoriev, A.I. et al. "Medical results of the fourth prime expedition on the orbital station MIR" en *Proceedings of the Fourth European Symposium on Life Sciences Research in Space*. ESA S.P. 307. November 1990; 19-22.
- (9). *Aviation Week & Space Technology*. February 15, 1988, 27.
- (10). Fink, D.E. *Aviation Week & Space Technology*. April 2, 1973, 38-44.
- (11). Germain, J.R. *Science et Vie*. Février 1987, 24-25.
- (12). *Aviation Week & Space Technology*. January 9, 1989, 23.
- (13). Semenov, Y.P. "Crew safety and rescue aids" en *Proceedings of the Workshop on Crew Safety and Rescue in Space*. ESA S.P. 300, August 1989; 37-42.
- (14). *Mission Scientifique et Technique a Bord de la Station Spatiale MIR*. Dossier d'Information. C.N.E.S. Toulouse, 1987.
- (15). Golden, F. *Time*. June 22, 1981, 44-45.
- (16). Ingelfinger, A.L. *Astronautics & Aeronautics*. May 1973, 61-65.
- (17). Grishayenkov, B.G. "Air Regenerating and Conditioning" en *Foundations of Space Biology and Medicine*. Vol. 3. Calvin, M., Gzenko, O.G. Eds. NASA S.P. 374, 1975; 56-110.
- (18). *Aviation Week & Space Technology*. October 18, 1976, 13.
- (19) Covault, C. *Aviation Week & Space Technology*. October 10, 1983, 23-26.