

Sistemas de Atmósfera en Vehículos y Trajes Espaciales

APUNTE OATEC

El diseño de atmósferas respirables en el espacio exterior es uno de los desafíos de ingeniería más críticos en la historia de la exploración espacial. Este apunte analiza dos escenarios fundamentales: la atmósfera dentro de la nave y la atmósfera del traje EVA, explicando las decisiones de diseño, los riesgos asociados y los protocolos de seguridad que mantienen vivos a los astronautas en el entorno más hostil conocido por el ser humano.

Las Dos Variables Críticas

Todo sistema de soporte vital atmosférico en el espacio debe equilibrar cuidadosamente dos magnitudes físicas: la presión total del entorno y la presión parcial de oxígeno (P_{O_2}). Comprender la diferencia entre estas dos variables es la clave para entender por qué los ingenieros toman decisiones tan distintas para la cabina de la nave respecto de las que toman para el diseño del traje espacial.

Presión Total (P_{total})

Es la fuerza por unidad de área que ejerce la mezcla de gases de manera perpendicular sobre las paredes del contenedor. Matemáticamente se expresa como $P = F/A$. Afecta directamente la rigidez mecánica del traje y el riesgo de enfermedad por descompresión.

Presión Parcial de O_2 (P_{O_2})

Es la fracción de la presión total que corresponde únicamente al oxígeno. Según la Ley de Dalton: $P_{O_2} = P_{total} \times f_{O_2}$, donde f_{O_2} es la fracción molar de oxígeno en la mezcla de gases (adimensional, entre 0 y 1). Demasiado bajo causa hipoxia, demasiado alto causa hiperoxia y riesgo de incendio.

Hipoxia

Falta de oxígeno. Ocurre cuando P_{O_2} cae por debajo del umbral fisiológico mínimo.

Normooxia

Rango fisiológico óptimo. La sangre se mantiene saturada al $\geq 95\%$.

Hiperoxia

Exceso de oxígeno. A presiones muy altas el oxígeno puro se vuelve tóxico.

Atmósfera Dentro de la Nave: ISS y Orión

En el interior de la Estación Espacial Internacional (ISS) y de la mayoría de las naves modernas como Orión, los astronautas respiran una mezcla de gases prácticamente idéntica al aire que respiramos en la superficie terrestre. Esta decisión de diseño no es arbitraria: es el resultado de décadas de experiencia operacional y de lecciones trágicas aprendidas a lo largo de la historia del programa espacial.

Composición	Presión Total	P(O ₂) resultante
78% Nitrógeno (N ₂) 21% Oxígeno (O ₂) 1% Otros gases (Ar, CO ₂ , vapor de agua)	101.3 kPa 14.7 psi 1 atmósfera — equivalente al nivel del mar en la Tierra	~21.3 kPa ≈ 3.1 psi Rango óptimo para la fisiología humana a largo plazo

Mantener 1 atm de presión con mezcla de aire terrestre tiene dos ventajas fundamentales. Desde el punto de vista fisiológico, el cuerpo humano está evolutivamente adaptado a esta condición; las misiones de larga duración en la ISS, de hasta seis meses o más, requieren que los astronautas no sufran efectos adversos derivados de la atmósfera que respiran. Desde el punto de vista científico, permite realizar experimentos biológicos, físicos y químicos en condiciones idénticas a las de la Tierra, eliminando una variable de confusión importante en la investigación.

¿Por Qué Nitrógeno? La Lección del Apollo 1

«El nitrógeno no es un ingrediente pasivo: es el guardián contra el fuego catastrófico.»

El 27 de enero de 1967, durante una prueba de ensayo en tierra del Apollo 1, un incendio se propagó de manera instantánea en la cabina, que en aquel momento contenía oxígeno puro al 100% a una presión de 1 atm. Los tres astronautas —Gus Grissom, Ed White y Roger Chaffee— fallecieron en cuestión de segundos. La investigación posterior determinó que prácticamente cualquier material que normalmente no arde en aire terrestre, se convierte en combustible en una atmósfera de oxígeno puro a alta presión.

Esta tragedia redefinió los estándares de diseño de la NASA. A partir del Apollo 7 se adoptó la mezcla de nitrógeno y oxígeno en tierra y durante el lanzamiento, reservando el uso de oxígeno puro únicamente para los trajes EVA a baja presión, donde el riesgo de ignición es mucho menor. El nitrógeno actúa como un gas de dilución: si bien es metabólicamente inerte para el cuerpo y no es tóxico a presiones normales, cumple la función crítica de reducir dramáticamente la velocidad de propagación de llamas.

 El oxígeno puro a 1 atm es extremadamente peligroso: acelera la combustión de materiales que normalmente no arden en aire. Esta fue la causa directa del incendio del Apollo 1 en 1967.

Atmósfera del Traje EVA: Exploración en el Vacío

Cuando los astronautas abandonan la nave para realizar una Actividad Extravehicular (EVA) —ya sea una caminata espacial en órbita o una futura exploración en la superficie de Marte— el diseño de la atmósfera del traje responde a una lógica completamente diferente, dominada por la necesidad de que el traje sea mecánicamente flexible.

Composición 100% Oxígeno (O₂) Sin nitrógeno ni otros gases	Presión Total 30.3 kPa ~0.3 atm — un tercio de la presión terrestre	P(O₂) resultante 30.3 kPa Suficiente para saturar la hemoglobina y sostener la vida
---	---	--

La lógica detrás de estas cifras es elegante en su ingeniería. Si se inflara el traje a la presión total de 1 atm en el vacío del espacio —donde la presión exterior es exactamente cero— la diferencia de presión sería de 101.3 kPa. El traje se volvería tan rígido como un neumático de camión: los astronautas serían incapaces de doblar los dedos, los codos, las rodillas, o cualquier articulación. Reducir la presión a 30.3 kPa hace el traje suficientemente flexible para trabajar durante las 6 a 8 horas que dura una EVA típica.

La Matemática Detrás del Oxígeno Puro

La elección del 100% de oxígeno en el traje EVA no es una preferencia: es una necesidad matemática derivada de la Ley de las Presiones Parciales de Dalton. Analicemos los dos escenarios posibles a una presión total de 30.3 kPa:

❌ Escenario A: Aire terrestre al 21% O₂

Si se usara la misma mezcla de la ISS dentro del traje a 30.3 kPa total:

$$P_{O_2} = 30.3 \text{ kPa} \times 0.21 \approx 6.63 \text{ kPa}$$

Esta presión parcial de oxígeno es insuficiente. El umbral fisiológico mínimo está aproximadamente en 16 kPa. Un astronauta con P_{O_2} de 6.63 kPa perdería el conocimiento en minutos y fallecería.
Resultado: hipoxia letal.

✅ Escenario B: Oxígeno puro al 100%

Con 100% de oxígeno a 4.3 psi total:

$$P_{O_2} = 30.3 \text{ kPa} \times 1.00 = 30.3 \text{ kPa}$$

Esta presión parcial se encuentra dentro del rango fisiológico funcional. La hemoglobina se mantiene saturada al $\geq 95\%$ y el cerebro recibe oxígeno suficiente.
Resultado: supervivencia y capacidad de trabajo.

Este análisis demuestra que la elección del 100% de oxígeno en el traje EVA no es una opción entre varias posibilidades equivalentes, sino la única solución matemáticamente viable dado el requisito de presión baja para garantizar la flexibilidad mecánica del traje. La ingeniería de sistemas de soporte vital es, en este sentido, un ejercicio de optimización con restricciones muy estrictas.

Tabla Comparativa: ISS vs. Traje EVA

El siguiente cuadro resume los parámetros clave de ambos entornos atmosféricos. Es fundamental memorizarlos y, más importante aún, entender la razón de ingeniería detrás de cada cifra.

Variable	Dentro de la Nave (ISS)	Traje EVA (Exploración)
Composición	78% N ₂ , 21% O ₂ , 1% otros	100% O ₂
Presión Total	101.3 kPa (1 atm)	30.3 kPa (~0.3 atm)
P(O ₂)	~21.3 kPa (~0.21 atm)	30.3 kPa (~0.3 atm)
Objetivo Principal	Confort a largo plazo, seguridad contra incendios, experimentación científica	Flexibilidad mecánica del traje, supervivencia biológica inmediata
Riesgo asociado	Acumulación de CO ₂ (requiere sistemas de filtrado con LiOH)	Enfermedad por descompresión si no se realiza el protocolo de pre-respiración

i Nótese que la P_{O_2} en el traje EVA (30.3 kPa) es en realidad **mayor** que en la ISS (21.3 kPa), a pesar de que la presión total es mucho menor. Esto es posible gracias al uso de oxígeno puro.

El Gran Peligro: Enfermedad por Descompresión (DCS, por sus siglas en inglés Decompression Sickness)

La Enfermedad por Descompresión —conocida históricamente entre los buzos como "la enfermedad de Caisson" o simplemente "the bends"— es el riesgo más inmediato asociado a la transición entre la atmósfera de la nave y la del traje EVA. Ocurre cuando el nitrógeno disuelto en la sangre y los tejidos del astronauta no tiene tiempo suficiente para salir del cuerpo de manera ordenada y forma **burbujas gaseosas en el interior del organismo**.

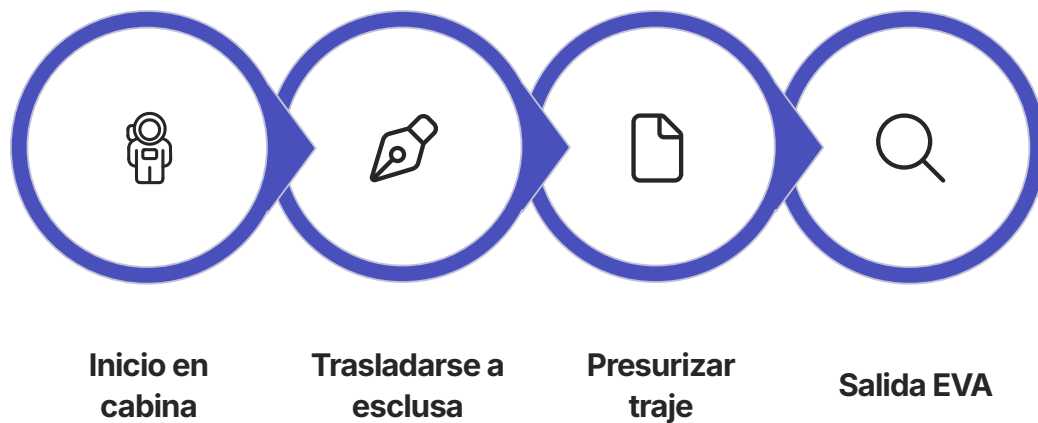
La analogía más ilustrativa es la de una botella de gaseosa. Cuando la botella está cerrada y a alta presión, el CO₂ permanece disuelto en el líquido—invisible, inofensivo. En cuanto se destapa y la presión cae bruscamente, el gas sale de solución de manera violenta formando burbujas. En el cuerpo humano, esas burbujas se forman en las articulaciones (causando dolores paralizantes que hacen que el afectado se doble de dolor, de ahí el nombre "bends"), en el sistema circulatorio (causando embolias potencialmente fatales) y en el sistema nervioso (causando daño neurológico irreversible).

→ Condición inicial	→ El problema	→ Consecuencias
El astronauta se encuentra dentro de la nave a 101.3 kPa (~1 atm). Su sangre y tejidos contienen nitrógeno disuelto en equilibrio con la atmósfera circundante, exactamente como le ocurre a cualquier ser humano en la Tierra.	Al pasar al traje EVA a 30.3 kPa (~0.3 atm), la presión ambiental cae drásticamente. El nitrógeno disuelto en el cuerpo intenta salir de solución, ya que la nueva presión no puede mantenerlo disuelto. Si este proceso ocurre demasiado rápido, se forman burbujas en lugar de ser exhalado paulatinamente.	Dependiendo de dónde se formen las burbujas: dolor articular intenso, embolia pulmonar o arterial, daño de la médula espinal, pérdida de visión, accidente cerebrovascular o muerte. La DCS sin tratamiento hiperbárico inmediato puede ser fatal.

Protocolo de Pre-Respiración (Pre-breathe)

«Antes de cada EVA, el astronauta debe "lavar" el nitrógeno de su cuerpo respirando oxígeno puro durante varias horas. Sin este protocolo, ninguna caminata espacial sería posible.»

El protocolo de pre-respiración es la solución de ingeniería operacional al problema de la enfermedad por descompresión. Su principio es simple: si se elimina el nitrógeno del cuerpo del astronauta **antes** de reducir la presión, no habrá nitrógeno que forme burbujas cuando la presión caiga. El proceso se basa en la respiración de oxígeno puro, que va reemplazando gradualmente el nitrógeno en la sangre y los tejidos —el nitrógeno es exhalado por los pulmones de manera progresiva y segura.



El tiempo requerido para el pre-breathe varía según el protocolo empleado. El protocolo estándar de la NASA para la ISS requiere entre 4 y 12 horas de pre-respiración, dependiendo de si el astronauta realiza ejercicio físico durante el proceso (el ejercicio acelera la eliminación del nitrógeno al aumentar el flujo sanguíneo y la ventilación pulmonar). Protocolos más modernos, como los desarrollados para el traje xEMU de las misiones Artemis, buscan reducir este tiempo combinando ejercicio moderado en bicicleta estática con periodos de respiración de mezclas enriquecidas en oxígeno.

- El protocolo de pre-respiración es un factor operacional crítico en la planificación de una EVA. Una caminata espacial de 6 horas puede requerir hasta 12 horas de preparación atmosférica previa.

Síntesis y Puntos Clave para el Estudio

El diseño de sistemas atmosféricos para misiones espaciales es un ejemplo magistral de ingeniería de sistemas: cada parámetro afecta a múltiples subsistemas simultáneamente —la fisiología del tripulante, la mecánica del traje, la seguridad contra incendios y los protocolos operacionales. A continuación se resumen los conceptos fundamentales de este apunte.

Concepto 1: La presión parcial de O_2 es el parámetro fisiológico determinante

No es la presión total ni el porcentaje de oxígeno por sí solos lo que determina si un astronauta puede respirar, sino su producto: $P_{O_2} = P_{total} \times f_{O_2}$. Un 21% de O_2 a 101.3 kPa (1 atm) y un 100% de O_2 a 30.3 kPa (~0.3 atm) producen P_{O_2} similares y ambas son fisiológicamente viables.

Concepto 2: La presión del traje EVA está dictada por la mecánica, no por la biología

30.3 kPa no es un valor biológicamente óptimo; es el mínimo necesario para que el traje sea flexible y utilizable. La biología del astronauta se adapta a esa restricción usando 100% O_2 como gas respiratorio.

Concepto 3: El N_2 en la nave es seguridad, no solo un diluyente neutro

Aunque químicamente actúa como un gas de dilución inerte para el organismo, el nitrógeno en la atmósfera de la ISS cumple una función de diseño activa para la supresión de incendios. Su presencia diluye el oxígeno y hace que materiales que arderían instantáneamente en O_2 puro sean seguros para el hábitat humano. La tragedia del Apollo 1 demostró empíricamente que O_2 puro a 101.3 kPa (1 atm) es incompatible con una cabina habitada de forma segura.

Concepto 4: La Enfermedad por Descompresión se previene, no se cura en órbita

En el espacio no existe una cámara hiperbárica de rescate. El protocolo de pre-respiración no es una precaución opcional: es la única medida preventiva disponible. La planificación operacional de una EVA debe incluir el tiempo completo de pre-breathe como requisito no negociable.