

Experimentación en condiciones de gravedad reducida

J. M. Perales, J. Meseguer, S. Pindado y E. Meseguer
IDR/UPM, Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva",
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, la ley de gravitación de Newton establece que entre dos cuerpos de masas M y m , cuyos centros de masas están separados entre sí una distancia r , aparece una fuerza de atracción que es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia: $F = GMmr^{-2}$, donde la constante de proporcionalidad, G , es la denominada constante de gravitación universal, que vale $G \cong 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$. Esta fuerza es la atracción gravitatoria, y la generalización del enunciado a n cuerpos es obvia.

En las proximidades de la Tierra el efecto dominante en la atracción gravitatoria es debido a la masa de la Tierra (aunque en algunos casos se deben tener en cuenta también otras masas menores próximas a nuestro planeta, la Luna, o grandes masas más alejadas, el Sol). Substituyendo en la expresión anterior el valor de la masa de la Tierra y de su radio medio se obtiene que, en su superficie, $F = g_0 m$, con $g_0 = GMr^{-2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, valor bien conocido.

Es pues evidente que cualquier sistema físico, donde quiera que se encuentre, está sometido a fuerzas de atracción gravitatorias. En la Tierra la gravedad condiciona el desarrollo y el comportamiento de los seres vivos e igualmente influye en todos los procesos físicos. Su influencia y sus efectos están muy hondamente arraigados en los seres humanos, de forma que el comportamiento en su ausencia nos resulta antinatural y difícil de intuir. De forma muy particular esto ocurre en los proce-

sos en los que intervienen fluidos. Si se centra la atención en estos últimos, resulta patente que si se pudiera prescindir de los efectos gravitatorios ciertos fenómenos ligados a éstos, como la convección inducida por la gravedad, sedimentación y flotabilidad, serían despreciables, con lo que se alcanzaría un entorno óptimo en el que llevar a cabo experimentos en los que otros efectos, enmascarados en un ambiente gravitatorio, serían dominantes. De este modo un entorno microgravitatorio ofrece un marco único de experimentación para el análisis de aspectos tales como agregación, cristalización, solidificación, adsorción y fenómenos de transporte de calor y masa en condiciones inimaginables en un laboratorio terrestre. La cancelación de la presión hidrostática permite, además, disponer de condiciones de experimentación especialmente útiles para el estudio de los fenómenos que acontecen cerca del punto crítico y para el estudio de efectos capilares.

La posibilidad de experimentar en condiciones de microgravedad, gracias –pero no exclusivamente– a la puesta en servicio de laboratorios orbitales ha ocasionado la aparición de un nuevo campo científico y tecnológico que a pesar de su corta historia ha contribuido notablemente a la mejora del conocimiento de muchos fenómenos físicos y al alumbramiento de innovaciones tecnológicas de indudable impacto en muchos procesos industriales.

En estas páginas se describen, necesariamente de forma breve, en primer lugar los diversos medios disponibles para la experimentación en condiciones de microgravedad, desde las torres de caída libre hasta las plataformas orbitales, con especial énfasis en aquellos que dependen de la Agencia Espacial Europea, pues son estos sin duda los de más

fácil acceso para la comunidad española. A continuación se presentan algunos detalles sobre la participación española en los programas de experimentación en microgravedad de la Agencia, y finalmente se enumeran las instalaciones experimentales que son parte de la contribución europea a la Estación Espacial Internacional (International Space Station, ISS), y en particular las que se instalarán en el módulo Columbus, instalaciones que sin duda marcarán el discurrir de la investigación en condiciones de gravedad reducida en los años venideros.

2. ENTORNO MICROGRAVITATORIO

En cualquier sistema de referencia no inercial se puede alcanzar lo que se conoce como entorno microgravitatorio haciendo que las fuerzas de D'Alembert que actúan sobre el sistema equilibren a la fuerza de la gravedad. Si la resultante de estas fuerzas es nula se habla de ingravidez, y si la resultante no es nula, pero pequeña, de microgravedad. Existen diversas formas de alcanzar un estado microgravitatorio (torres de caída libre, vuelos parabólicos en aviones, cohetes de sondeo y plataformas

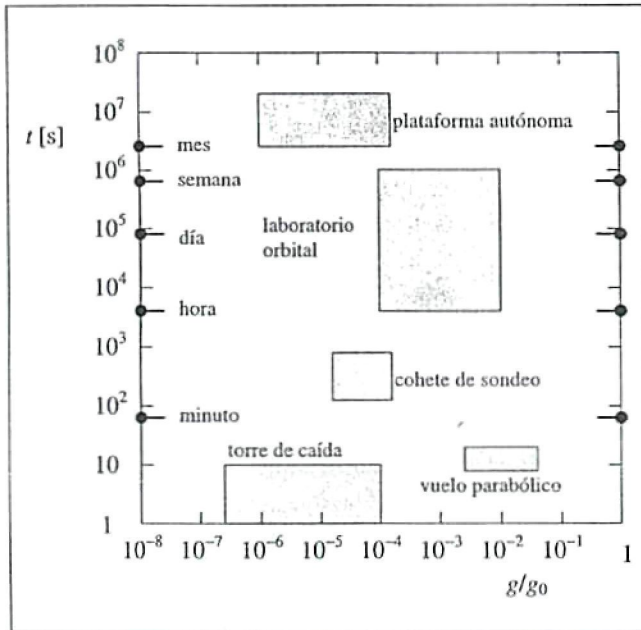


FIGURA. 1.

Nivel de microgravedad, medido por el cociente g/g_0 entre la aceleración residual, g , y la aceleración de la gravedad terrestre en la superficie de la Tierra, g_0 , y duración típica de los períodos durante los que se alcanza, t , en algunas plataformas [Ref. 1].

orbitales), aunque el tiempo durante el que se consigue este estado y el nivel de aceleración residual sobre el sistema varía notablemente de unos medios a otros. En la figura 1 se ha representado el dominio típico (en términos de nivel de microgravedad alcanzado y duración típica de la oportunidad) de diferentes opciones experimentales.

El nivel de microgravedad alcanzable en un sistema de referencia determinado depende de la rotación y de la aceleración angular del mismo, de las fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema y de las posibles no uniformidades de los campos de fuerzas exteriores, de modo que el entorno de ingravidez ideal se consigue cuando la rotación de la plataforma es nula, cuando el objeto de interés experimental está en el centro de masas del marco de referencia y cuando además se anulan las fuerzas de reacción y las superficiales (en la tabla 1 se in-

TABLA 1.

Factores que condicionan el entorno microgravitatorio de una instalación experimental situada en una plataforma orbital [Ref. 1].

Fuerzas másicas exteriores no uniformes	Campos Coulombianos (por ejemplo, gradientes de gravedad) Campos electromagnéticos generados por fuentes externas
Fuerzas de Coriolis	Rotación absoluta de la plataforma Movimiento de masas dentro de la plataforma Vibración de la instalación experimental
Fuerzas centrífugas	Rotación absoluta de la plataforma Distancia del experimento al centro de masas de la plataforma
Otras fuerzas de D'Alembert	Rotación de la instalación respecto a la plataforma Movimiento de masas dentro de la instalación experimental Vibraciones Momentos debidos a campos de fuerzas externas Variación con el tiempo de la configuración de la plataforma
Fuerzas sobre las superficies exteriores de la plataforma	Fuerzas aerodinámicas Presión de radiación Viento solar
Reacciones sobre la plataforma	Empuje de motores principales Subsistema de control de actitud Evacuación de fluidos

dican algunas fuentes de perturbación que pueden alterar la situación ideal de ingravidez).

Quizás la forma más simple de conseguir un entorno de microgravedad en una plataforma experimental sea dejando que ésta se mueva libremente bajo la única acción de la fuerza de la gravedad: en algunos museos dedicados a las ciencias y las tecnologías hay instalaciones en las que se solicita al usuario que se coloque sobre una plataforma y que dé un salto. Tras el salto la instalación informa al usuario del tiempo que ha durado éste, que es el tiempo que ha estado en "ingravidez". Sin embargo este tiempo es tan corto (los saltos de la mayoría de nosotros difícilmente duran más de medio segundo), que resulta de poca utilidad desde un punto de vista práctico.

Puesto que el objetivo es conseguir tiempos de microgravedad más largos, una opción posible es aumentar la altura del salto, lo que conduce al concepto de torre de caída libre, en la que una cápsula de experimentación se deja caer libremente en un recinto vertical. En una torre de caída se pueden obtener tiempos de microgravedad de unos pocos segundos, si bien antes hay que resolver otros problemas.

Cuando un cuerpo cae en el seno de un fluido, además de la atracción de la gravedad hay que considerar la resistencia aerodinámica. Como la resistencia aerodinámica crece con el cuadrado de la velocidad, se comprende que conforme aumenta la

velocidad del cuerpo la resultante de las fuerzas que actúan sobre el mismo (gravedad y resistencia aerodinámica) es cada vez menor, de modo que al poco el cuerpo disminuye progresivamente su aceleración, y más tarde ya cae con velocidad uniforme en vez de seguir un movimiento acelerado, como ocurriría si sólo actuara la atracción gravitatoria (ésta es la velocidad límite, que se alcanza cuando la resistencia aerodinámica equilibra a la fuerza de la gravedad).

Resulta pues imposible conseguir un movimiento uniformemente acelerado desplazando un cuerpo en el aire si la única fuerza adicional es la atracción gravitatoria, y a la vista de estas consideraciones es evidente que en una torre de caída o bien se hace el vacío en el recinto de caída (para disminuir la resistencia aerodinámica), o bien se dota a la cápsula de experimentación de un sistema de propulsión que mantenga el movimiento acelerado o se acude al concepto de cápsula y carena aerodinámica (que es mucho más sencillo y barato que los anteriores, y por tanto empleado en algunas torres de caída libre de prestaciones más modestas, véase la tabla 2).

En el tercer concepto lo que se deja caer es un recipiente carenado que lleva en su interior la cápsula de experimentación (véase la figura 2). Ambos dispositivos se sueltan simultáneamente y, durante la caída, el recipiente carenado, que se desplaza a gran velocidad respecto al aire del recinto de caída,

TABLA 2.

Torres de caída libre: altura de caída libre, h ; tiempo de microgravedad, t ; masa de la cápsula incluidos los equipos experimentales, M ; presión en el recinto de caída, p ; y nivel de microgravedad alcanzable, g/g_0 .

Institución	h [m]	t [s]	M [kg]	p [Pa]	g/g_0	Tipo de cápsula
JAMIC ¹ (Hokkaido)	490	10.0	500	$10^5/\nu$	10^{-5}	carena propulsada y cápsula
LRC ² (Cleveland)	145	5.0	450	vacío	10^{-5}	cápsula presurizada
ZARM ³ (Bremen)	110	4.7	170	1	10^{-4}	cápsula presurizada
MGLAB ⁴ (Tokio)	100	4.5	400	vacío	10^{-5}	cápsula presurizada
MSFC ⁵ (Huntsville)	100	4.3	180	10^5	10^{-5}	cápsula presurizada
LRC ² (Cleveland)	30	2.2		10^5	10^{-5}	carena aerodinámica
INTA ⁶ (Madrid)	21	2.1	70	10^5	10^{-4}	carena aerodinámica y cápsula
IDR/UPM ⁷ (Madrid)	15	1.6	30	10^5	10^{-4}	carena aerodinámica y cápsula

¹ JAMIC: Japan Microgravity Center.

² LRC: Lewis Research Center.

³ ZARM: Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation.

⁴ MGLAB: Microgravity Laboratory of Japan.

⁵ MSFC: Marshall Space Flight Center.

⁶ INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

⁷ IDR/UPM: Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva".

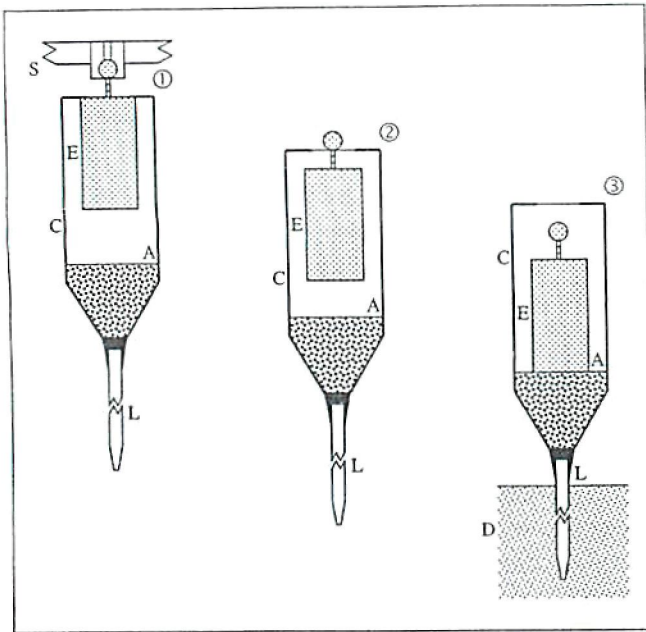


FIGURA. 2.

Esquema de una instalación de carena aerodinámica y cápsula de experimentación para ensayos de caída libre. S: sistema de suelta del conjunto carena-cápsula, E: cápsula de experimentación, C: carena aerodinámica, A: amortiguador interior, L: dardo para el frenado del conjunto, y D: material de frenado (generalmente un lecho de arena seca). En los esquemas se muestra el sistema en la parte más alta de la torre, antes de la suelta (1), en un instante intermedio de la caída (2) y en la parte baja de la torre (3).

va disminuyendo progresivamente su aceleración debido a la resistencia aerodinámica, pero la cápsula de experimentación no se mueve respecto al aire del recinto de caída, sino respecto al aire contenido en el interior de la carena. La velocidad relativa entre la cápsula y el aire que la rodea es pequeña y por tanto también es pequeña la resistencia aerodinámica, de modo que el movimiento de la cápsula en el interior de la carena es con mucha aproximación uniformemente acelerado (mientras la cápsula no alcance el fondo de la carena). Este método admite todavía algunos refinamientos: hacer el vacío en el interior de la carena y equiparla con algún sistema de propulsión. De este modo se puede conseguir compensar la resistencia aerodinámica de la carena haciendo que caiga siguiendo un movimiento uniformemente acelerado (con aceleración igual a la de la gravedad), y además, al desplazarse la cápsula de experimentación en vacío, se habrá eliminado también la pequeña resistencia aerodinámica que origina el movimiento de ésta en el aire.

Sea cual fuere el método empleado en una torre de caída libre, un problema adicional es la elevada deceleración que han de sufrir los equipos al final del recorrido de caída libre (típicamente del orden de 20 g_0), aunque la mayoría de la instrumentación de laboratorio aguanta estos niveles de deceleración sin problemas.

Por supuesto se podría duplicar el tiempo de experimentación si en vez de dejar caer simplemente al equipo de experimentación desde lo alto de la torre se habilitara un dispositivo que permitiera su disparo desde la base de la torre, pues en tal caso en el período de microgravedad habrá que computar tanto el tiempo empleado en la subida como el empleado en la bajada (en algunas de las torres de caída mencionadas hay instalados dispositivos de este tipo, aunque se usan escasamente debido a la complejidad de su utilización).

Otro concepto semejante a las torres de caída son los tubos de caída (Tabla 3), que suelen ser recintos verticales en los que se hace el vacío (para minimizar, como ya se ha dicho, el efecto de la resistencia aerodinámica) y en cuyo interior se deja caer libremente la muestra a ensayar (generalmente gotas de materiales fundidos).

TABLA 3.

Tubos de caída libre: altura de caída libre, h ; tiempo de microgravedad, t ; diámetro típico de las muestras, ϕ ; presión en el recinto de caída, p ; y nivel de microgravedad alcanzable, g/g_0 .

Institución	h [m]	t [s]	ϕ [mm]	p [Pa]	g/g_0
MSFC ¹ (Huntsville)	105	4.6	5	10^{-4}	10^{-4}
CENG ² (Grenoble)	47	3.0	3-6	10^{-7}	10^{-9}

¹ MSFC: Marshall Space Flight Center.

² CENG: Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble.

Para alcanzar períodos de microgravedad mayores, hasta veinte o veinticinco segundos, se puede acudir a vuelos parabólicos en aviones. El avión, supuesto en vuelo horizontal, ejecuta una maniobra de subida y posterior bajada, de modo que la trayectoria descrita sea una parábola. Durante el trayecto parabólico el piloto debe ajustar en todo instante el empuje de los motores, de forma que éste equilibre a la resistencia aerodinámica del avión, y la actitud de la aeronave para que no se produzca

sustentación, consiguiendo así que el centro de masas de la aeronave describa una trayectoria parabólica análoga a la que describiría un punto móvil sometido únicamente a la atracción gravitatoria.

Desgraciadamente el nivel de microgravedad alcanzable en un avión en vuelo parabólico difícilmente está por debajo de $10^{-2} g_0$, y esto es así porque, aun en el supuesto de que se cumplan las condiciones antes estipuladas, existen otras fuentes de perturbación (principalmente las vibraciones producidas por los motores) que se transmiten a los equipos anclados a la estructura. En cualquier caso el nivel de microgravedad mencionado requiere una habilidad excepcional del piloto, que ha de estar especialmente entrenado.

Se puede mejorar el nivel de microgravedad dejando que los equipos de experimentación puedan flotar libremente en el interior de la cabina del avión, pero esta opción está severamente limitada por la masa de los mismos, ya que al final de cada parábola el vehículo ha de recuperar la trayectoria horizontal, y esta maniobra significa aceleraciones muy notables, del orden de $2 g_0$, que pueden conducir al choque del equipo con las paredes de la cabina o con algún ocupante de la misma.

Las aeronaves utilizadas desde 1989 para vuelos parabólicos en Europa han sido primero un Caravelle 234 y más recientemente un Airbus A300 [Ref. 2]. En un vuelo típico, el entorno microgravitatorio en la cabina se alcanza gracias a las siguientes maniobras: con la aeronave en vuelo horizontal estacionario se inicia una subida con una inclinación del orden de 50° durante unos 20 segundos, durante la que se alcanzan niveles de aceleración entre $1.8 g_0$ y $2.0 g_0$. Tras esta primera etapa se reduce el empuje de los motores durante unos 20 segundos; en esta fase el empuje es el necesario para compensar la resistencia aerodinámica del avión, de modo que la aeronave ejecute un vuelo parabólico libre. Mientras la aeronave está cayendo, y cuando su eje longitudinal forma de nuevo con la horizontal un ángulo de unos 50° , se aumenta el empuje de los motores y el vehículo es acelerado hasta $1.8 g_0$ ó $2.0 g_0$ durante otros 20 segundos hasta alcanzar de nuevo el vuelo horizontal estacionario (figura 3).

Estas maniobras se ejecutan a intervalos de dos minutos, realizándose del orden de treinta parábolas durante un vuelo, con un descanso de unos ocho o diez minutos a mitad del vuelo.

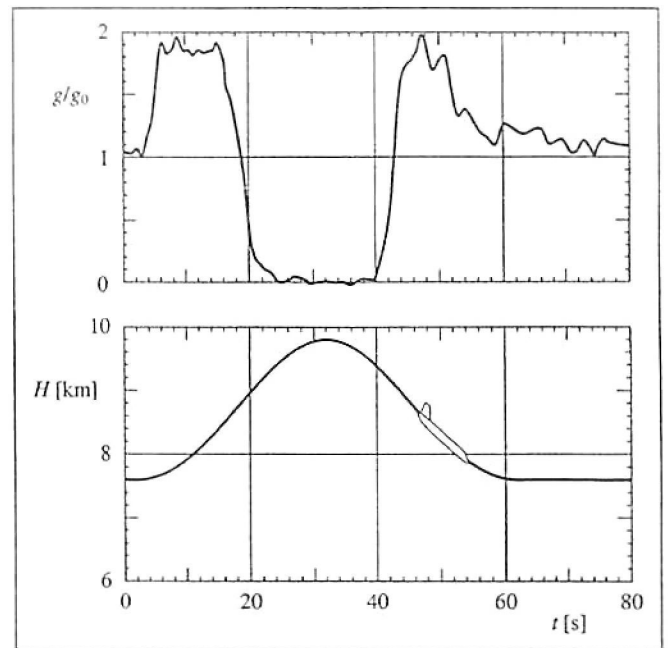


FIGURA 3.

Perfiles típicos de variación con el tiempo, t , del nivel de aceleración en el interior de la cabina, g/g_0 , y de la altitud de vuelo, H , en un avión en vuelo parabólico.

Para conseguir períodos de microgravedad todavía mayores hay que acudir a vuelos parabólicos en cohetes de sondeo, lo que precisa que la secuencia experimental pueda ser ejecutada en modo automático o teleoperada desde tierra, pues obviamente en este caso no se puede contar con la presencia de operadores humanos.

En Europa los cohetes de sondeo para ensayos de microgravedad se lanzan desde la base de Kiruna, en Suecia, situada por encima del círculo Polar Ártico. Los cohetes utilizados son de combustible sólido, generalmente de dos etapas (véase la tabla 4). En un vuelo, por ejemplo, de un cohete TEXUS, la secuencia típica de acontecimientos desde el lanzamiento del cohete hasta la recogida de la cápsula donde se alojan los diversos módulos de experimentación es como se describe en la tabla 5.

Sin duda las condiciones óptimas para la experimentación en microgravedad, tanto en lo que se refiere al valor de la relación g/g_0 como a la duración del período de microgravedad, se alcanzan en las plataformas orbitales, sean éstas tripuladas (Skylab, Spacelab, Mir, Spacehab y ahora la Estación Espacial Internacional) o no tripuladas (satélites).

A bordo de un laboratorio orbital el nivel de microgravedad también está limitado, pues sobre un

TABLA 4.

Cohetes de sondeo europeos: apogeo, a ; tiempo de microgravedad, t ; masa de la carga útil, M ; y nivel de microgravedad alcanzable, g/g_0 [Ref. 2].

Programa	a [km]	t [s]	M [kg]	g/g_0	Propulsión
MINITEXUS	180	200	100	10^{-4}	Dos etapas de combustible sólido
TEXUS ¹	260	370	360	10^{-4}	Dos etapas de combustible sólido
MASER ²	300	420	500	10^{-4}	Dos etapas de combustible sólido
MAXUS	715	700	780	10^{-4}	Una etapa de combustible sólido

¹ TEXUS: Technologische Experimente Unter Schwerelosigkeit.

² MASER: Materials Science Experiment Rocket.

TABLA 5.

Secuencia típica de acontecimientos en un vuelo de cohete de sondeo TEXUS.

Acontecimiento	t [s]	H [km]	g/g_0
Ignición de la primera etapa (tiempo de quemado: 3.7 s) Estabilización por giro a 4.5 Hz	0	0	hasta 12
Separación de la primera etapa	5.5	1.4	2.0×10^{-1}
Ignición de la segunda etapa (tiempo de quemado: 39 s)	6.0	1.55	hasta 9
Fin de quemado de la segunda etapa	45.0	49	1.4×10^{-2}
Inicio de la fase de disminución de la velocidad de giro	56.0	69.9	7.0×10^{-3}
Fin de la fase. La velocidad de giro final es de 0.1 Hz	57.5	72.7	4.0×10^{-3}
Separación del motor	59.0	75.4	2.4×10^{-3}
Activación del sistema de control de actitud. Inicio del periodo de microgravedad	73.0	100	10^{-4}
Apogeo	255.0	250	10^{-4}
Fin del periodo de microgravedad	437.5	100	10^{-4}
Reentrada	483.0	19.3	25
Apertura del paracaídas	533.0	6	10

vehículo en órbita baja alrededor de la tierra hay que contabilizar un amplio número de efectos que tienden a perturbar el equilibrio de fuerzas que actúan sobre el centro de masas de la plataforma (recuérdese la tabla 1). Con todo, aunque el valor del cociente g/g_0 no sea todo lo espectacular que sería de desear (véase la figura 4), la ventaja indudable de una instalación orbital es la gran duración del tiempo de microgravedad disponible, varios órdenes de magnitud por encima de los períodos de microgravedad alcanzables con los otros medios descritos en párrafos anteriores.

Todos estos medios de experimentación en microgravedad han permitido a la comunidad científica internacional planear y desarrollar experimentos

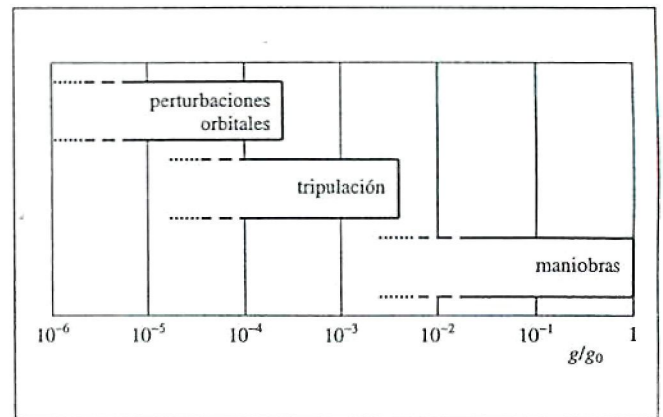


FIGURA 4.

Variación de la calidad del entorno microgravitatorio en un laboratorio orbital para distintas fuentes de perturbación.

en los que la gravedad juega un papel secundario, poniendo de manifiesto otros efectos que quedan enmascarados en los laboratorios terrestres, habiéndose concentrado las actividades de investigación en tres grandes campos: biología, ciencias de los materiales y física de fluidos.

3. LA INVESTIGACIÓN EN MICROGRAVEDAD EN ESPAÑA

En lo que a España se refiere, las actividades científicas y tecnológicas en el ámbito de la microgravedad están en gran medida condicionadas por nuestra pertenencia a la Agencia Europea del Espacio. Nuestro país es uno de los miembros fundadores de esta Agencia, cuya actividad se estructura en torno a diversos programas, unos de participación obligatoria y otros de suscripción voluntaria. En los programas obligatorios los países miembros contribuyen en función del volumen relativo de su Producto Interior Bruto (PIB), mientras que en los de carácter voluntario el grado de participación depende de los intereses y prioridades de carácter tanto científico como industrial que determine cada país. Desde los orígenes del Programa de Microgravedad de la ESA, España ha participado en este programa voluntario con una contribución ciertamente pequeña (en los últimos años la aportación española al Programa de Microgravedad está en torno al 2% del total). A pesar de esta presencia a veces casi testimonial, y aunque la comunidad nacional relacionada con la microgravedad es todavía en extremo reducida (tan sólo cinco grupos de investigación españoles han participado hasta la fecha en el desarrollo de experimentos en cohetes de sondeo o en plataformas orbitales), el trabajo desarrollado goza de reconocimiento internacional, habiendo alcanzado cotas de excelencia muy notables.

Si hubiera que ligar un nombre a las actividades españolas en este campo éste sería sin duda el del Profesor Ignacio Da Riva, promotor y director hasta su muerte (ocurrida en 1991) de un grupo de investigación y desarrollo tecnológico conocido en aquellos tiempos como LAMF (Laboratorio de Aerodinámica y Mecánica de Fluidos), que fue el germen de lo que hoy es el Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM).

La participación científica española en el campo de la microgravedad arranca en 1974, cuando el Prof. Da Riva, en respuesta a una solicitud de propuestas de experimentación en microgravedad para el laboratorio orbital Spacelab de la ESA, propuso a esta Agencia la realización de un experimento sobre el comportamiento de columnas fluidas en condiciones de baja gravedad. Esta propuesta del Prof. Da Riva fue aceptada por ESA, y para su ejecución en vuelo fue preciso desarrollar un módulo de experimentación específico (Fluid Physics Module, FPM) capaz de satisfacer los requisitos tanto del experimento del prof. Da Riva como de otros cuatro experimentos europeos relacionados también con diversos aspectos de la física de fluidos en microgravedad. Este primer módulo, FPM, sufrió con el tiempo diversas mejoras, alumbrando una segunda versión (Advanced Fluid Physics Module, AFPM) que a su vez ha sido la base para el desarrollo del laboratorio europeo FSL (Fluid Science Laboratory), una de las cuatro instalaciones experimentales que irán embarcadas en el módulo europeo Columbus de la Estación Espacial Internacional (ISS).

La primera misión europea del Spacelab (SL-1) estaba inicialmente prevista para 1978 pero, como suele ser frecuente en las actividades espaciales, el programa Spacelab sufrió retrasos muy notables, de modo que esta primera misión europea no tuvo lugar hasta 1983. En este tiempo se había ya consolidado, bajo la dirección del Prof. Da Riva, el grupo de investigación y desarrollo tecnológico (LAMF) antes citado. Una de las líneas de trabajo de este grupo, todavía activa, es el comportamiento de puentes líquidos en microgravedad, campo en el que además de los avances teóricos hay que contabilizar un amplio número de resultados experimentales obtenidos tanto en instalaciones terrestres (puentes líquidos milimétricos, microgravedad simulada mediante la técnica de flotabilidad neutra en tanques de Plateau, torres de caída libre), vuelos parabólicos en aviones KC-135 y Caravelle, cohetes de sondeo TEXUS (Vuelos 10, 12, 18, 23, 30 y 32) y plataformas orbitales (además de la SL-1, ha habido experimentos de IDR/UPM en las misiones SL-D1, SL-D2 y en los satélites UPM-Sat 1 y MINISAT 01, véase la tabla 6).

Como se ha mencionado, las actividades científicas y tecnológicas relacionadas con la microgravedad en España han sido y siguen siendo minoritarias. Aunque este campo ha atraído la atención de

TABLA 6.

Experimentos en microgravedad de los grupos científicos españoles en el período 1983-1998 en aviones en vuelos parabólicos (V), cohetes de sondeo (X) y plataformas orbitales (O).

	IDR/UPM ¹	UAM/UA ²	DMT/UPM ³	DFM/UAM ⁴	IACT/UG ⁵
1983	O				
1984	X, V				
1985	O, X, V	O			
1986			V		
1987			V, V		
1988	X				
1989	X	O	V		
1990					
1991					
1992	X	O			
1993	O, O	O			
1994	X	O, O			
1995	O, V	O	X		
1996		O	V	O	O
1997	O				
1998				O	O
1999					
2000			X		

¹ Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio da Riva", Universidad Politécnica de Madrid.

² Facultades de Medicina de las Universidades Autónoma de Madrid y de Alicante.

³ Departamento de Motopropulsión y Termodinámica. E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid.

⁴ Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Autónoma de Madrid.

⁵ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Universidad de Granada/CSIC.

un número considerable de científicos españoles (como así lo atestigua el número de publicaciones firmadas por autores españoles), sin embargo hasta la fecha sólo unos pocos grupos nacionales han participado en los diversos programas de utilización de las instalaciones para experimentación en microgravedad que la Agencia Europea del Espacio ofrece a la comunidad científica internacional. Esto probablemente sea debido a la complejidad de los procedimientos que es preciso seguir para realizar una experiencia en un cohete de sondeo o en un laboratorio orbital, y a lo dilatado de los plazos que transcurren desde que nace la idea experimental hasta que se lleva a cabo su ejecución, si bien estos plazos están sufriendo notables reducciones en los últimos tiempos.

En la tabla 6 se han resumido las actividades experimentales de los grupos españoles en este área de la microgravedad. Además de los experimentos avalados por investigadores del IDR/UPM hay que destacar las diversas campañas de experimentación sobre combustión en microgravedad llevadas a cabo en vuelos parabólicos en aviones KC-135 y Caravelle, así como en misiones MINITEXUS (Departamento de Motopropulsión y Termodinámica de la Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Aeronáuticos), y los experimentos sobre crecimiento y envejecimiento de seres vivos (*Drosophila melanogaster*) realizados en las misiones SL-D1, IML-1 e IML-2 de Spacelab, y en los satélites rusos Biokosmos 9, Bion 10 y Foton 9, 10 y 11. El motor de esta línea de investigación biológica es el grupo ubicado en el Departamento de Bioquímica de la Universidad Autónoma

de Madrid (Facultad de Medicina), en el Instituto de Investigaciones Biomédicas (un instituto conjunto de esta universidad y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC), y también un grupo de investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Alicante.

Además de estos grupos cuyas actividades relacionadas con la microgravedad comenzaron en la década de los ochenta, en los noventa se deben contabilizar también otros dos grupos, uno en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid (Departamento de Física de Materiales) implicado en temas de crecimiento de cristales de semiconductores (Vuelos STS 78 y STS 95), y un segundo en el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, un instituto de la Universidad de Granada y

del CSIC, dedicado al crecimiento de cristales de proteínas (Vuelos STS 78 y STS 95).

4. UTILIZACIÓN DE LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

En la actualidad se está viviendo un período de transición dentro del esquema de utilización del entorno microgravitatorio espacial: el laboratorio orbital europeo Spacelab está ya fuera de servicio, la estación rusa Mir ha finalizado también su vida operativa, y aunque se sigue pudiendo hacer experimentos de microgravedad en órbita en el laboratorio norteamericano Spacehab y en las cápsulas rusas Foton, faltan unos pocos años todavía para la entrada en servicio de los módulos de uso científico de la Estación Espacial Internacional (ISS), prevista, para los laboratorios europeos, para finales de 2004. Sin embargo, esta situación cambiará radicalmente en un futuro próximo, cuando la ISS esté totalmente operativa. La Estación Espacial contará con un módulo presurizado de la Agencia Europea del Espacio (Columbus Orbital Facility, COF), al que España contribuye con un porcentaje del 5%. Esto brindará a nuestros científicos, al igual que al resto de la comunidad internacional, la oportunidad de utilizar las nuevas instalaciones orbitales siempre que sus propuestas de experimentación posean el grado de excelencia requerida. Las propuestas de la comunidad científica española, como país miembro de la ESA, habrán de ser canalizadas lógicamente a través de esta Agencia, para que sean ejecutadas en alguna de las instalaciones de experimentación del módulo Columbus.

Tal como se indica en la tabla 7, en el módulo Columbus irán alojados los cuatro laboratorios desarrollados por la Agencia Europea del Espacio que integran este módulo así como un quinto armario donde se almacenarán otras instalaciones experimentales autónomas (nótese que el Labora-

TABLA 7.
Instalaciones experimentales europeas en la Estación Espacial Internacional.

Instalaciones en el módulo norteamericano Destiny
• Material Science Laboratory (MSL): Low Gradient Furnace (LGF)
Instalaciones en el módulo europeo Columbus Orbital Facility (COF)
• Material Science Laboratory (MSL): Solidification and Quenching Furnace (SQF)
• BIOLAB
• Fluid Science Laboratory (FSL)
• European Physiology Module (EPM)
• European Drawer Rack (EDR)
Otros experimentos europeos no acomodados en el European Drawer Rack (EDR) ni en otras instalaciones estándar de la ISS

torio de Ciencias de Materiales, MSL, consta de dos hornos, uno situado en el módulo europeo Columbus y otro en el estadounidense Destiny).

En la tabla 8 se muestran posibles áreas de aplicación de estos laboratorios estándar del módulo europeo Columbus, así como los métodos de diagnóstico estándar disponibles en cada uno de ellos (una descripción mucho más detallada de estas instalaciones experimentales se puede encontrar en las Refs. 3, 4 y 5).

TABLA 8.
Características de las instalaciones estándar para ensayos en microgravedad embarcadas en el módulo europeo Columbus de la Estación Espacial Internacional.

Instalación	Aplicaciones	Diagnóstico
BIOLAB	Cultivo de células Microorganismos Pequeñas plantas Pequeños invertebrados Radiación sobre células y tejidos	Microscopía Espectrofotometría
Material Science Laboratory (MSL)	Solidificación Materiales compuestos Crecimiento de cristales Propiedades de los materiales	Efecto Seebeck Resistencia eléctrica de la muestra Termometría Marcado por pulsos de Peltier
Fluid Science Laboratory (FSL)	Formación y crecimiento de burbujas Fenómenos de condensación Parámetros termofísicos Solidificación direccional	Velocimetría PIV Termografía Interferometría
European Physiology Module (EPM)	Funciones metabólicas Cardiovascular Esqueleto y sistema muscular Neurociencia	Análisis de sangre, orina y saliva

La ISS significará un cambio cuantitativo muy significativo en la experimentación en microgravedad, con una disponibilidad de tiempo de experimentación que estará órdenes de magnitud por encima de la actual, aunque no está previsto que la disponibilidad de tripulación para la realización de los experimentos aumente de igual modo. Por esta razón se ha ido gestando un nuevo modo de operar los experimentos que se efectúen en el espacio, lo que se ha dado en llamar teleciencia, de manera que en muchas ocasiones será posible operar desde tierra, desde el propio laboratorio del investigador interesado, las instalaciones embarcadas en la ISS, y recibir prácticamente en tiempo real los datos experimentales generados a bordo.

Para garantizar el funcionamiento de este modo de operación distribuida, la ESA ha articulado un sistema de centros asociados a cada uno de los "laboratorios" o instalaciones de Columbus, denominados Centros Responsables de Instalación (Facility Responsible Centre, FRC), Centros de Soporte (Facility Support Centre, FSC) y Centros de Usuario (User Home Base, UHB), organizados según el esquema de la figura 5.

Los Centros Responsables, FRC, uno por cada instalación de experimentación o "laboratorio" de Columbus, estarán coordinados por el Centro de Control de Columbus (COF-CC), situado en GSOC (en Oberpfaffenhofen, cerca de Munich) y por el Equipo de Gestión de Misión de la Agencia (MMT, Mission Management Team). Durante la preparación y realización de las operaciones de las cargas útiles de cada una de las instalaciones, cada FRC tendrá el control de las funciones siguientes:

Funciones preparatorias

- Planificación de las operaciones en la instalación asignada
- Operación del modelo de ingeniería para la preparación de la instalación y los experimentos a desarrollar
- Desarrollo y depuración de los procedimientos de uso de la instalación
- Entrenamiento de tripulaciones para el manejo de la instalación y el desarrollo de los experimentos
- Entrefase con los usuarios en el desarrollo de experimentos
- Entrefase con el Centro de Control de Columbus y con el Equipo de Gestión de Misión

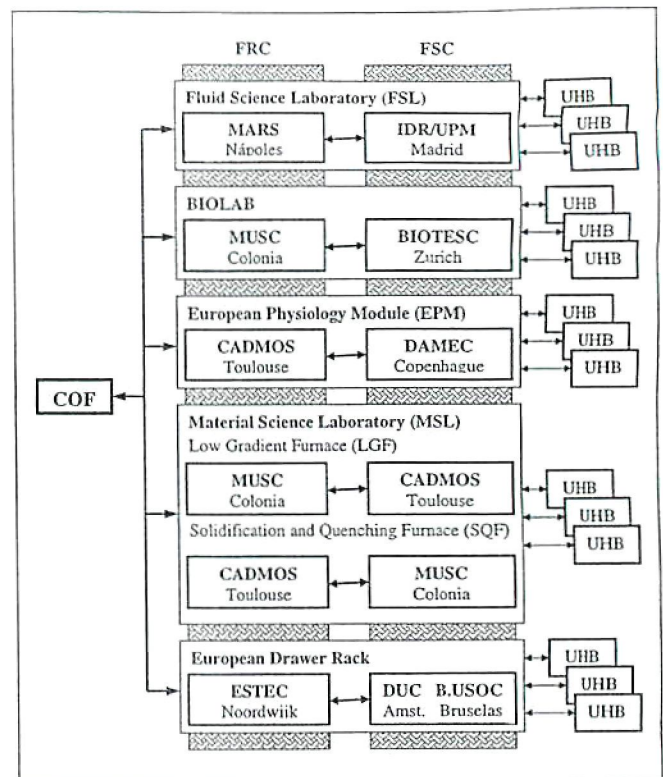


FIGURA 5.

Diagrama de bloques del modo de operación descentralizado de las instalaciones de experimentación en microgravedad del módulo europeo Columbus.

para la preparación de la ejecución de los experimentos durante la misión

- Validación y cualificación de los experimentos
- Validación de los procedimientos de la tripulación
- Entrenamiento de los usuarios en el manejo de la instalación y en tareas operacionales

Funciones ejecutivas durante la misión:

- Operación de la instalación según la planificación
- Operación del modelo de ingeniería para la misión o para tareas de soporte de ingeniería
- Operaciones de teleciencia
- Replanificación de la utilización de la instalación
- Suministro a los usuarios de la infraestructura de operaciones de la misión
- Entrefase entre los usuarios y el Centro de Control de Columbus y el Equipo de Gestión de Misión durante la ejecución de los experimentos en la misión

- Validación de los datos científicos
- Coordinación del proceso de la información con posterioridad a la misión y soporte técnico a usuarios

Para llevar a cabo estas funciones los Centros Responsables (FRC) contarán con la ayuda de los Centro de Soporte (FSC). Los FSC, normalmente también uno por cada instalación, estarán coordinados por el FRC asociado, y serán de su responsabilidad las funciones siguientes:

Funciones preparatorias:

- Soporte técnico para el desarrollo de los experimentos
- Planificación de los experimentos y apoyo en la planificación las operaciones en la instalación asignada
- Preparación de los experimentos utilizando el modelo de ingeniería
- Desarrollo, depuración y validación de los procedimientos de ejecución de los experimentos
- Apoyo en las tareas de entrenamiento de tripulaciones
- Entrefase con los usuarios en el desarrollo de experimentos
- Integración y ensayos de los experimentos
- Entrefase con el Centro Responsable para la preparación de la ejecución de los experimentos durante la misión

Funciones ejecutivas durante la misión:

- Apoyo en las tareas que posibiliten llevar a cabo las operaciones de la instalación y los experimentos según la planificación
- Apoyo a las tareas de las operaciones de teleciencia que se lleven a cabo desde el FRC
- Replanificación de la ejecución de experimentos
- Suministro a los usuarios la infraestructura de operaciones de la misión
- Entrefase entre usuarios y el Centro de Control de Columbus y el Equipo de Gestión de Misión durante la ejecución de los experimentos en la misión
- Validación de los datos científicos
- Coordinación del proceso de la información con posterioridad a la misión y soporte técnico a usuarios

Además, los FRC y FSC actuarán nacionalmente (hay uno por país miembro) como entrefase entre los científicos de su país de todas las disciplinas (no sólo de la que están específicamente encargados) y el sistema de centros de operación de la ISS.

Finalmente, un Centro de Usuario (User Home Base, UHB) es el laboratorio o instituto de un investigador principal cuya propuesta de experimentación haya sido seleccionada para ser llevada a cabo en Columbus. La participación de los UHB en las operaciones de las cargas útiles de Columbus estará coordinada a través del FRC o del FSC asignado, y su papel dentro de la estructura organizativa es suministrar a cada investigador principal la posibilidad de participar en los ciclos de planificación y replanificación de los experimentos, así como participar activamente en la ejecución de su experimento y dar soporte técnico a la operación del mismo.

5. AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a los Profesores E. Diéguez (DFM/UAM), J. M. García-Ruiz (IACT/UG), R. Marco (DB/UAM) y J. J. Salvá (DMT/UPM), así como al Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) por la ayuda prestada para la elaboración de esta comunicación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MALMÉJAC, Y., BEWERSDORFF, A., DA RIVA, I. & NAPOLITANO, L. G.: "Challenges and Perspectives of Microgravity Research in Space, ESA BR-05", *ESA Scientific & Technical Publications Branch*, ESTEC, Noordwijk, 1981.
- [2] "Facilities for Microgravity Investigations in Physical Sciences supported by ESA, ESA SP-1116 (Revision 2)", *ESA Publications Div.*, ESTEC, Noordwijk, 1995.
- [3] REIBALDI, G., BEHRMANN, P., IVES, J., MUNDORF, H. & MANNIERI, P.: "The Microgravity Facilities for Columbus Programme", *ESA Bulletin*, Nº. 90, pp. 6-20, 1997.
- [4] KNOTT, K.: *The European Research Plans for ISS*, en "Proceedings of the 2nd European Symposium on the Utilisation of the International Space Station", ESA SP-433, pp. 47-51, *ESA Publications Div.*, ESTEC, Noordwijk, 1999.
- [5] REIBALDI, G.: *European Facilities for Microgravity and Life Sciences Research and Applications*, en "Proceedings of the 2nd European Symposium on the Utilisation of the International Space Station", ESA SP-433, pp. 55-67, *ESA Publications Div.*, ESTEC, Noordwijk, 1999.