

INVESTIGACION ESPACIAL.

EXPERIMENTO 1 - ES - 331

Por I. MARTINEZ HERRANZ
Dr. Ingeniero Aeronáutico

y J. MESEGUER RUIZ
Ingeniero Aeronáutico

1. INTRODUCCION

En 1974, la Agencia Espacial Europea ofreció a los investigadores europeos posibilidades de experimentación a bordo del laboratorio espacial «Spacelab»; del centenar de solicitudes presentadas respondiendo a este ofrecimiento, sólo una era española (entre las cien solicitudes fueron seleccionados unos 70 experimentos, entre ellos el español, que se realizará durante el primer vuelo del «Space-lab»). Esta escasa participación española pudiera ser debida a la novedad.

En 1978 se abrió el plazo de admisión de propuestas de experimentación para los vuelos posteriores y, en el primer turno de propuestas, de las 219 solicitudes presentadas vuelve a haber solamente una española (continuación de la anterior). No se puede pensar ahora en la novedad como factor determinante de tan ínfima participación, tampoco es admisible la idea de falta de interés, más bien parece que existe un defecto de acomodación, y los extensísimos cuestionarios que es preciso rellenar cuando todavía no se tiene una idea exacta del experimento (y el interrogante de los medios de financiación) condicionan desfavorablemente el interés de los posibles investigadores.

Es preciso fomentar la participación española en los programas internacionales de investigación espacial, y para ello es vital suministrar el máximo de ayuda e información durante la fase inicial. Esperamos que esta publicación sirva para acelerar el desarrollo de esta participación.

2. LA INVESTIGACION ESPACIAL

Desde los tiempos más remotos se tiene noticia de actividades humanas relacionadas con el estudio del espacio exterior (Astronomía), estando limitada la posición del punto de vista del observador a la superficie de la Tierra. La búsqueda de altura en los emplazamientos de los puestos de observación (montañas, torres, etc.) ya suponía la ventaja de un acercamiento al espacio; sin embargo, hasta esta segunda mitad del siglo XX el hombre no ha logrado romper la atadura impuesta por la gravedad terrestre.

Con la salida del hombre al espacio aparecieron nuevos intereses: 1) observar la Tierra de un modo global y tratar de mejorar la vida en ella mediante un control más

adecuado de sus recursos (mineralogía, agricultura, meteorología, demografía, etc.); 2) tratar de aprovechar las peculiares condiciones del espacio (temperatura, presión y gravedad despreciables) para el estudio y producción de nuevos materiales, y 3) predecir las consecuencias que el ambiente espacial puede producir sobre el hombre y sobre la materia viva en general.

Siguiendo este desarrollo natural, la investigación del espacio, hoy día, puede agruparse en cuatro grandes materias:

Astrofísica. Incluye el estudio de las nebulosas, galaxias, el Sol y los planetas, previéndose para un futuro próximo las siguientes actividades: análisis de todo el espectro de radiación mediante grandes telescopios orbitales de uso múltiple y envío de nuevas sondas automáticas a los planetas lejanos y al Sol.

Geofísica. El cuerpo celeste más importante para el hombre es la Tierra. Se sabe muy poco sobre su interior y su envoltura externa ya que el estudio de la Tierra ha estado, casi siempre, limitado a su superficie. Para llenar este vacío se requiere un estudio profundo de la aceleración gravitatoria local, del campo magnético terrestre y su interacción con el viento solar, física de plasmas, meteorología, etc. Por otra parte, aparece una gran variedad de aplicaciones del estudio de la Tierra de las que el hombre puede aprovecharse directamente para mejorar sus condiciones materiales de vida: observación y control de recursos minerales, vegetales, marinos y del medio ambiente en general, navegación, comunicaciones, etc.

Materiales. Bajo este difuso apelativo se pueden incluir los diferentes estudios sobre la influencia del ambiente espacial en la estructura y comportamiento de los materiales. Por ejemplo, los materiales sólidos se obtienen normalmente por solidificación de sus fundidos, y sobre éstos, al igual que sobre todos los líquidos, la gravedad produce unos efectos de importancia capital. El objetivo primario es el de mejorar el conocimiento que actualmente se tiene de los materiales usados en la Tierra, aunque se prevé la aplicación a la construcción y habitabilidad de estaciones espaciales.

Biología. Al igual que sobre los materiales inertes, el ambiente espacial afecta directamente al comportamiento de los organismos vivos. Durante una evolución de unos

tres mil millones de años la materia viva se ha ido adaptando a las condiciones en la superficie de la Tierra; de entre ellas, varias pueden reproducirse dentro de las naves espaciales (presión, temperatura, humedad, composición atmosférica, etc.); otras, como las radiaciones, son sólo importantes en vuelos de larga duración, pero la falta de gravedad es siempre de gran importancia e irreproducible en tierra por lo que es necesario analizar las consecuencias que la exposición a ingravidez trae consigo. Los efectos sobre la fisiología humana a corto plazo ya se han empezado a estudiar, sin embargo, los daños y transformaciones genéticas que pudiesen aparecer son todavía imprevisibles.

En conclusión, es preciso remarcar el hecho de que las ciencias espaciales ya no son las astrofísicas, sino que son las ciencias comunes de cada día: metalurgia, medicina, botánica, farmacología, química, etc. Con la incorporación de toda esta materia de investigación espacial y la posibilidad de vuelos orbitales frecuentes y económicos, se abre una nueva frontera para el hombre.

3. LA INVESTIGACION ESPACIAL EN ESPAÑA

España es uno de los once países miembros de la Agencia Espacial Europea (ESA). Este organismo fue creado en 1975 para coordinar y remodelar las actividades espaciales en Europa Occidental que previamente se realizaban en ESRO (satélites científicos) y ELDO (vehículos lanzadores). El objetivo de la agencia es suministrar y promover, para usos exclusivamente pacíficos, la necesaria colaboración entre los estados miembros europeos en materia de ciencia y tecnología espacial.

En España, la Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE) es el organismo encargado de promover, coordinar y financiar la investigación espacial en centros españoles a nivel nacional e internacional.

Actualmente participan en el programa de la CONIE las siguientes instituciones:

- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA (actúa, además, como organismo ejecutivo de la CONIE).
- Servicio Meteorológico Nacional.
- Observatorio del Ebro.
- Observatorio Astronómico de Madrid.
- Instituto de Astrofísica de Canarias.
- Instituto Geográfico Nacional.
- Centro de Investigación Física «Torres Quevedo».
- Junta de Energía Nuclear.
- Universidad de Barcelona.
- Universidad Autónoma de Barcelona.
- Universidad de Zaragoza.
- Universidad Politécnica de Madrid.

Las instalaciones y equipos disponibles a nivel nacional (administrados por el INTA) son los siguientes:

- Laboratorio de ensayos ambientales.
- Laboratorio de electrónica.
- Laboratorio de óptica y radiación.
- Estación espacial de Madrid.
- Estación de lanzamiento de cohetes El Arenosillo.

En cuanto a la utilización de instalaciones y equipos internacionales (como el laboratorio espacial «Spacelab»), la participación española está todavía en la fase preparatoria, pero las perspectivas son prometedoras. El programa actual de investigaciones de la CONIE incluye:

- Meteorología (en colaboración con la NASA).
- Ionosfera.
 - Lanzamiento de cohetes en cooperación NASA-CNES-CONIE.
 - Capa D.
 - Estudio teórico de la ionosfera al amanecer y al atardecer.

- Radiación cósmica.
 - Ensayos de materiales plásticos como detectores de radiación de alta energía.
 - Composición isotópica de la radiación de baja energía.
- Astrofísica.
 - Región ultravioleta del espectro.
 - Radiación infrarroja con cohetes.
 - Región de rayos X del espectro.
- Sensores y observación terrestre con aviones y cohetes.
- Influencia de la radiación infrarroja en el cultivo de vegetales.
- Sistemas de comunicación para satélites.
- Propulsores de hidracina.
- Experimentos en el «Spacelab».

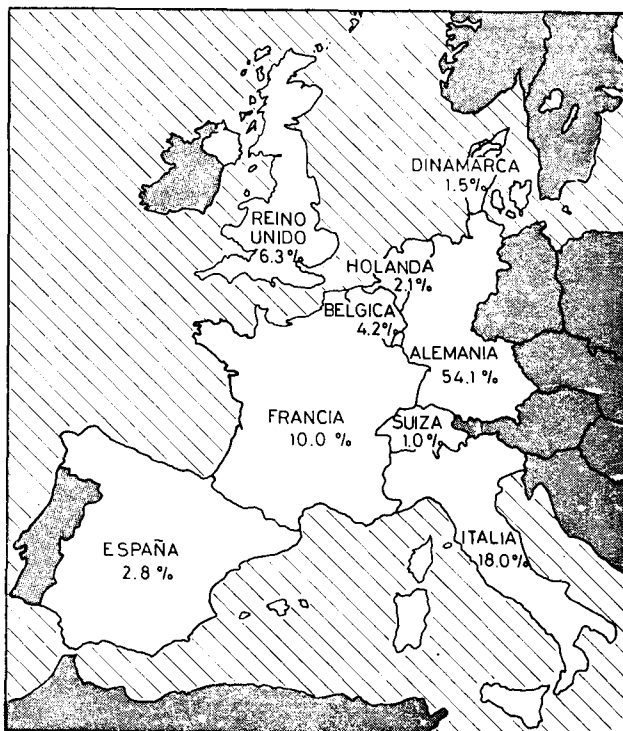
4. EL LABORATORIO ESPACIAL «SPACELAB»

Estamos asistiendo en nuestros días al desarrollo de una empresa sin precedentes en el campo de la investigación espacial: la cooperación de las agencias espaciales Europea (ESA) y Norteamericana (NASA) en un ambicioso programa común, el laboratorio espacial «Spacelab».

El «Spacelab», al que han contribuido diversas naciones, según se indica en la fig. 1, será la primera carga de pago del vehículo lanzador reutilizable «Shuttle» (desarrollado por la NASA) que en la actualidad se encuentra ya en la etapa de las primeras pruebas orbitales. La puesta en órbita del laboratorio espacial está prevista para abril de 1982.

El «Spacelab» irá alojado en la bodega de carga del «Orbiter», que es el vehículo lanzador propiamente dicho (fig. 2). Una vez desprendidos los cohetes auxiliares y el depósito exterior de combustible, el «Orbiter» quedará en

Fig. 1. Países europeos participantes en el programa «Spacelab».



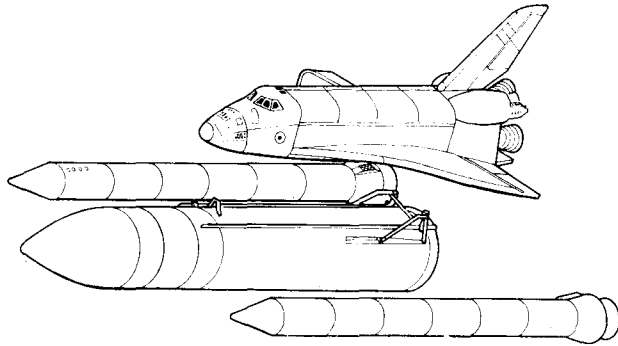


Fig. 2. Vehículo lanzador «Space Shuttle» desarrollado por la NASA.

una órbita baja de estacionamiento (a 300 km. de altura), entonces se abrirán las compuertas de la bodega quedando el «Spacelab» tal como se muestra en la fig. 3. (Ver pág. 19.)

El «Spacelab» es una nave espacial no autónoma formada por una cabina habitable (conectada al «Orbiter» mediante un túnel de acceso) y plataformas exteriores en las que se agrupará aquella parte del equipo que por necesidades de investigación requiera estar expuesto al vacío exterior, precise de un campo de visión no alcanzable desde el interior de la cabina o sea demasiado voluminoso. En el «Spacelab» se dispondrá de un lugar de trabajo óptimo en condiciones de gravedad nula, contándose además con la asistencia del equipo del «Orbiter» (donde se encontrará la vivienda de las tripulaciones de ambas naves).

El laboratorio espacial se ha diseñado con el ánimo de disponer de una nave versátil, adoptándose una concepción modular fácilmente readaptable a las necesidades de de futuras misiones. Como ejemplo, en la fig. 4 se muestran seis posibles configuraciones, indicándose, además, algunas características de las mismas.

CONFIGURACION	CABINA VOLUMEN [m ³]	PLATAFORMA	
		AREA UTIL [m ²]	LONGITUD [m]
	5 a 8	70	12
	5 a 8	53	9
	13 a 23		
	13 a 23	17,5	3
	13 a 23	35	6
		90	15

Fig. 4. Algunas configuraciones posibles del laboratorio espacial «Spacelab».

La misma filosofía se ha seguido en el interior de la cabina (fig. 5). Cada banco de trabajo constituye un módulo intercambiable dotado de su propio microprocesador, lo que permite una amplia libertad en la preparación e integración de los equipos de experimentación. El volumen útil por banco es de 0,8 m³ y la capacidad de carga de unos 240 kg.

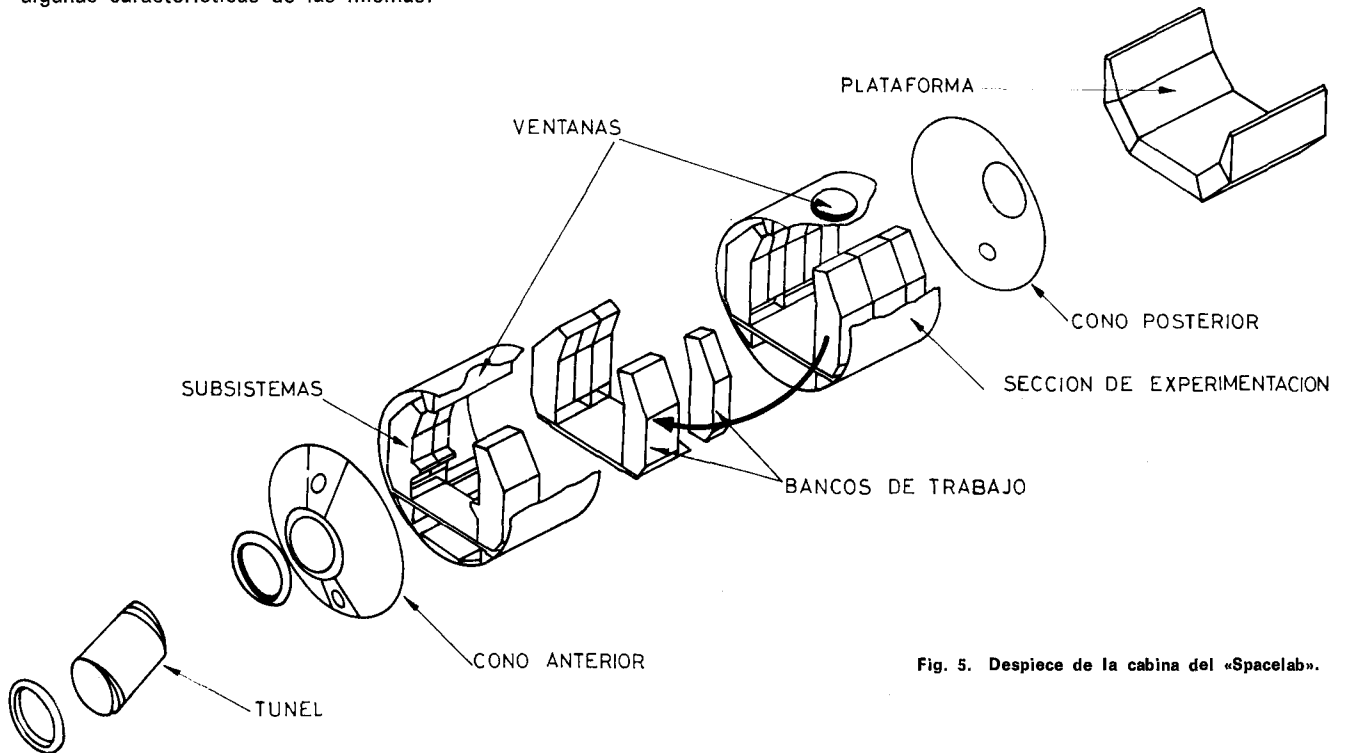


Fig. 5. Despiece de la cabina del «Spacelab».

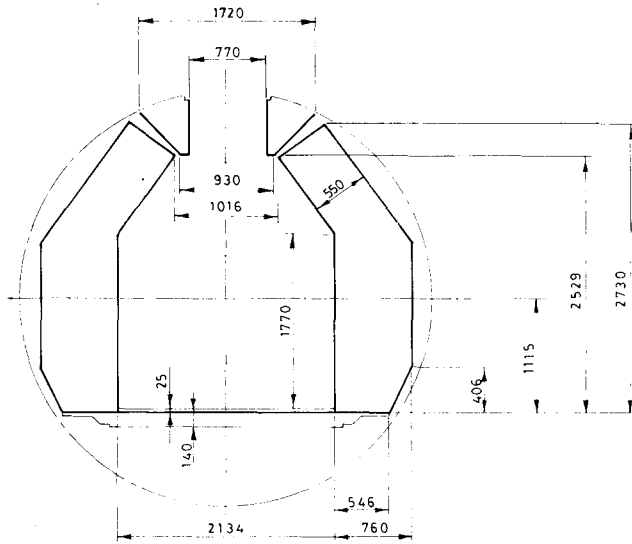


Fig. 7. Dimensiones interiores del «Spacelab» (cotas en mm.).

En la fig. 6 (ver pág. 19) se muestra una vista exterior de una maqueta a escala real del «Spacelab», indicándose en la fig. 7 las dimensiones de los bancos de trabajo y otras cotas indicativas del espacio disponible en el interior de la cabina.

El programa de vuelos previstos con este laboratorio se indica en la Tabla 1, aunque el calendario señalado no es definitivo, pues existen problemas de financiación. Estos primeros vuelos tendrán siete días de duración, aunque podrían extenderse hasta un mes.

5. PROGRAMA DE UTILIZACION DEL «SPACELAB»

Los objetivos principales del programa de utilización del «Spacelab» son:

- Ofrecer al mayor número posible de científicos y técnicos un laboratorio (y observatorio) espacial multidisciplinario.

- Reducir drásticamente los costos y tiempos requeridos para la experimentación espacial. En el programa «Spacelab» el costo por kilo de carga útil es de unos dos millones de pesetas, un orden de magnitud menor que en otros vuelos anteriores (ocho millones por kilo). El coste total de la primera misión, excluidos los equipos de experimentación, será de unos cinco mil millones de pesetas repartidos al cincuenta por ciento entre la NASA (lanzamiento) y la ESA (integración de los equipos).
- Posibilitar que la investigación espacial se pueda hacer directamente por científicos y técnicos sin un entrenamiento completo como astronautas.

Las investigaciones que se van a realizar en el «Space-lab) cubren una gran variedad de temas fundamentales, como puede verse en la Tabla 2. El primer vuelo del «Spacelab» no es completamente operacional, ya que la misión fundamental es comprobar el funcionamiento correcto de todos sus sistemas. La carga útil de este primer vuelo estará repartida al 50 por 100 entre ESA y NASA, y este 50 por 100 debe ser todavía dividido entre Biología, Ciencias de los Materiales, Geofísica y Astrofísica. Para vuelos posteriores está prevista una especialización en las disciplinas abarcadas, separándolas en dos grandes grupos: vuelos especiales para gravedad reducida y vuelos de observación de la Tierra (más adelante se aña-

Fecha	Disciplina
1982	Multidisciplinario
1982	Ingravidez
1983	Geofísica
1983	Ingravidez
1984	Astrofísica

Tabla 1. Programa de vuelos europeos del «Spacelab».

Disciplina	Actividades	Nº	
Biología y Medicina	Fisiología y Cultivos	9	
Ciencias de los Materiales	Gases	Condensación	1
	Líquidos	Convección, Capilaridad, etc.	10
	Sólidos	Solidificación	30
Geofísica	Plasmas y Recursos Terrestres	7	
Astrofísica	Corona Solar y Astronomía	6	

Tabla 2.

Experimentos en el primer vuelo del «Spacelab».

dirá una tercera clase de vuelos especiales para estudios astronómicos). La fig. 8 da una idea de la orientación del «Spacelab» según la misión.

5.1. BIOLOGIA Y MEDICINA

Si el hombre ha de viajar por el espacio exterior, es necesario determinar el efecto de ese nuevo ambiente sobre su salud a corto, medio y largo plazo. Los experimentos a realizar son muy diversos y van desde observar el poder de discriminación de masas en ingravidez (si el astronauta puede distinguir dos bolas iguales de masas diferentes) hasta estudiar el efecto de la ingravidez sobre la proliferación de linfocitos.

La Tabla 3 resume los nueve experimentos que se van a llevar a cabo en el primer vuelo.

En general, es preciso considerar el efecto de las características peculiares de los vuelos espaciales tripulados: ingravidez, radiaciones, lanzamiento y reentrada, pérdida del ciclo diario, composición atmosférica en la nave, temperatura, presión, etc. Estos efectos se pueden agrupar en:

Efectos a corto plazo: Movimiento de la sangre y demás fluidos corporales, pérdida de la orientación, postura y agilidad, ilusiones ópticas por radiación, contaminación radiactiva, dificultad de readaptación a gravedad normal, efectos psicológicos, etc.

Efectos a largo plazo: Pérdida de la capacidad motora por atrofia muscular, descalcificación ósea, pérdida de glóbulos rojos, pérdida de inmunologías, daños del sistema cardiovascular, contaminación radiactiva, incapacidad de readaptación, efectos psicológicos, etc.

Cuando el estudio directo sobre los astronautas lleve consigo riesgos o daños intolerables, se utilizarán animales para los ensayos.

Se dispone ya de un cierto número de módulos de ex-

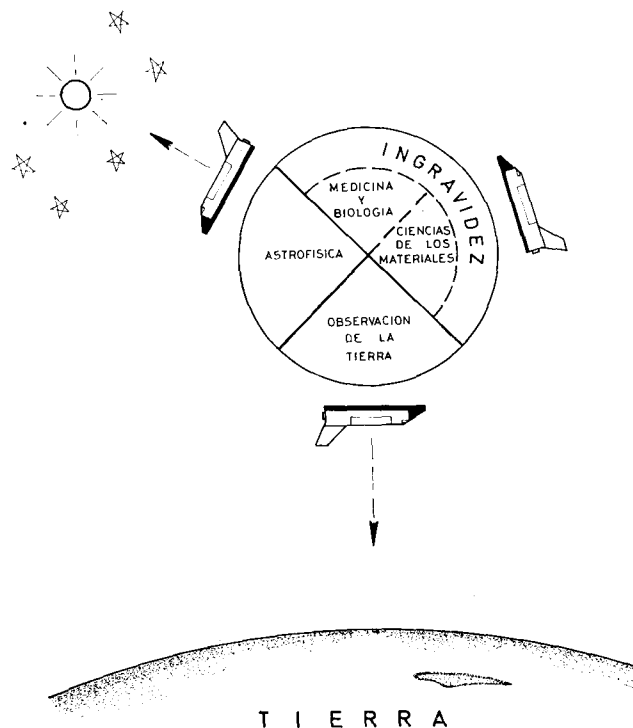


Fig. 8. Orientación del conjunto «Orbiter-Spacelab» según el tipo de misión.

perimentación biológica y del «sled» como equipos de uso unitario. En la fig. 9 (ver página 20) se muestra el «sled»: un asiento móvil sobre carriles que se utilizará durante el primer vuelo para investigaciones sobre el ór-

Tabla 3. Experimentos biológico-médicos en el primer vuelo del «Spacelab».

Código	Responsable	Experimento
1-ES-028	A. Scano (Roma)	Balisto-cardiografía tridimensional
1-ES-026	D. Gauer (Berlin)	Medida de la presión venosa intratorácica
1-ES-030	H. Green (Londres)	Registro electrofisiológico personal
1-ES-201	R. von Baumgarten (Mainz)	Experimentos vestibulares (SLED)
1-ES-025	H. Ross (Stirling)	Discriminación de masas
1-ES-031	A. Cogoli (Zurich)	Proliferación de linfocitos
1-ES-027	H. Bücker (Frankfurt)	Efectos biológicos de las partículas pesadas de alta energía
1-ES-029	G. Horneck (Frankfurt)	Efectos de la radiación en los sistemas biológicos

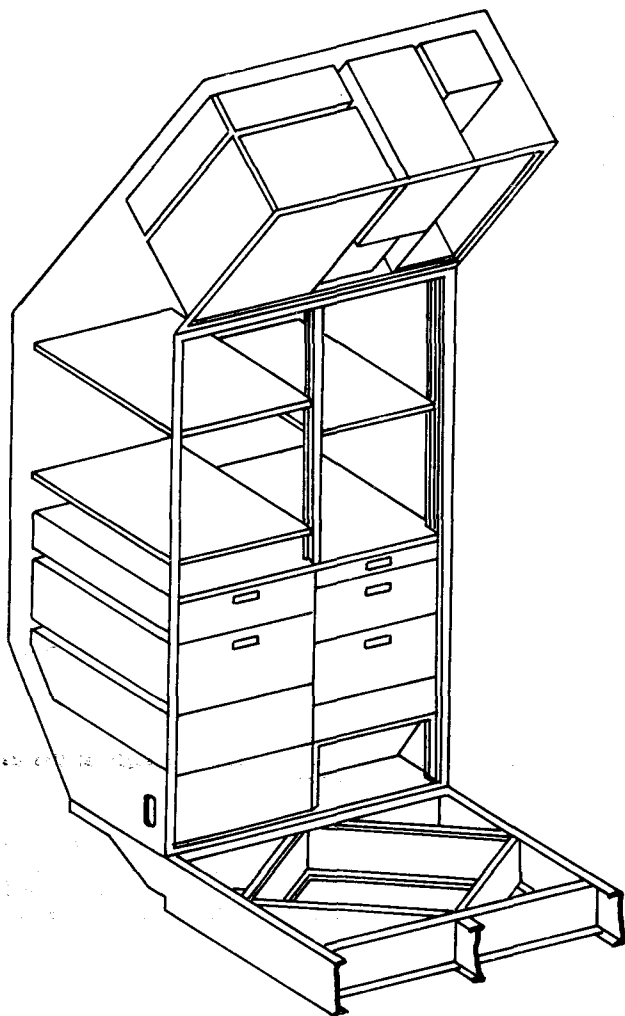


Fig. 10. Banco doble de trabajo asignado al área de Ciencias de los Materiales en la primera misión del «Spacelab»; en las bandejas irán alojados los hornos y el Módulo de Física de Fluidos.

gano vestibular. el «sled» será instalado en el pasillo del «Spacelab» durante el vuelo orbital. Los equipos integrantes del «sled» son:

- Asiento para el sujeto a experimentar.
- Raíles, estructuras y soporte del asiento.
- Motor autocontrolado y programable para acelerar y decelerar.
- Consola de mando y control.
- Arnés de transmisión de datos desde el asiento a la consola.

5.2. CIENCIAS DE LOS MATERIALES

La gravedad terrestre es, a escala molecular, completamente despreciable (excepto en las proximidades de los puntos críticos líquido-gas), pero a escala macroscópica es una de las fuerzas dominantes, dando lugar a deformaciones importantes en estructuras sólidas, fuerzas hidrostáticas y de flotabilidad (navegación marítima), sedimentación, superficies horizontales de líquido en recipientes, convección de líquidos y gases por efecto de un gradiente térmico o de concentración, etc.

Directa o indirectamente todas las ciencias de los ma-

teriales que requieren estudio en condiciones de gravedad reducida están relacionadas con la Física de Fluidos, ya sea porque se estudien materiales líquidos (los gases no presentan fenómenos particulares), o bien porque se estudie la formación de materiales sólidos a partir de disoluciones o fundidos.

Las áreas de estudio previstas en este campo son:

- *Física de Fluidos*: Posición de las superficies libres de líquidos en ingravidez (depósitos de combustible y agua), comportamiento de líquidos en recipientes elásticos (organismo humano), transporte de calor y masa, puntos críticos, etc.
- *Química*: Inicio y propagación de reacciones químicas, combustión, coalescencia, cédulas electrolíticas, electroforesis, etc.
- *Metalurgia*: Solidificación, moldeo, purificación, aleaciones inmiscibles, segregación, difusión, nucleación, etc.
- *Materiales compuestos*: Dispersión y coalescencia de partículas y fibras.
- *Monocristales*: Crecimiento cristalino, difusión, dislocaciones.

Los tipos disponibles en la actualidad se resumen a continuación:

- Hornos isotermos para ensayos metalúrgicos y cerámicos hasta 2.000 K con una precisión de ± 10 K, para muestras en cartuchos de 100 mm. de longitud por 40 mm. de diámetro.
- Hornos de perfil de temperatura controlado, hasta 10.000 K/m., para solidificación unidireccional, termodifusión, etc.
- Hornos de espejos para cristalización de silicio y otros materiales de alta temperatura de fusión (hasta 2.500 K).
- Módulo de Física de Fluidos (FPM) para el estudio de zonas líquidas flotantes de hasta 130 mm. de longitud y 60 mm. de diámetro.
- Laboratorios químicos.
- Módulos de ensayos con fluidos contenidos.

Estos equipos podrán ser alojados en un banco de trabajo doble (Material Science Double Rack: MSDR) a bordo del «Spacelab» (fig. 10) aunque en la primera misión sólo se dispondrá de los hornos mencionados anteriormente y del módulo de Física de Fluidos.

5.3. OBSERVACION DE LA TIERRA Y GEODESIA

Desde hace unos años se ha empezado a considerar seriamente el problema del control del medio ambiente debido al alarmante deterioro observado en la evolución de la biosfera: aguas contaminadas, polución atmosférica, enfermedades epidémicas, demografía, etc.; en general, cambios irreversibles debidos al hombre que han provocado una degradación manifiesta de la calidad de la vida. Cómo hemos llegado a esta situación y qué porvenir nos espera son preguntas clave hoy día que están empezando a oscurecer el desenfundado deseo de avances técnicos de los dos últimos siglos.

Código	Responsable	Experimento
1-ES-330	J.P.B. Vreeburg (Amsterdam)	Movimiento acoplado de sistemas sólido-líquido en ingravidez
1-ES-327	J.M. Haynes (Bristol)	Cinemática del mojado de sólidos
1-ES-329	J.F. Padday (Harrow)	Fuerzas capilares en ingravidez
1-ES-331	I. Da-Riva (Madrid)	Estabilidad de las zonas flotantes
1-ES-326	H. Rodot (Meudon)	Amortiguamiento de las oscilaciones de un líquido en ingravidez
1-ES-328	L.G. Napolitano (Nápoles)	Convección libre en ingravidez

Tabla 4. Experimentos en el FPM durante la primera misión «Spacelab».

Para afrontar este problema es preciso tomar en consideración no sólo las particularidades locales en la superficie de la Tierra, sino el conjunto total comprendido entre la corteza terrestre y la alta atmósfera.

El programa de observación de la Tierra comprende las siguientes áreas de estudio:

- Meteorología.
- Composición de la media y alta atmósfera.
- Análisis de cultivos y demás recursos terrestres.
- Campo gravitatorio y electromagnético.
- Dinámica terrestre (rotación, deriva de continentes).
- Comunicaciones y navegación.

Los aparatos de uso comunitario que se han diseñado para este fin son, por el momento:

- Cámara métrica para la producción de mapas fotográficos a escala 1:50.000 sobre topografía y recursos terrestres.
- Sensor remoto de microondas para el estudio del espectro de olas en el mar, medición de temperatura y producción de imágenes de muy alta resolución (campo de 25×25 metros).
- Telescopio infrigerado por helio para usos astronómicos y de observación de la atmósfera terrestre; tipo Cassegrain de 40 cm. de apertura, montado sobre una plataforma especial de alimentación con una precisión de ± 20 microradianes.
- Polarímetro multiespectral sensible en seis canales, desde 0,4 a 1,1 micras, para el análisis del polvo atmosférico y de la estructura tridimensional de la cobertura nubosa.
- Emisor-receptor de impulsos de láser de alta potencia.

Conviene resaltar que la mayoría de estos instrumentos son completos; es decir, que la labor investigadora se hará sobre las imágenes obtenidas.

5.4. ASTROFISICA

La astronomía es la más antigua de las ciencias del espacio. Aparentemente el beneficio que este estudio reporta a la humanidad es mínimo, pero basta para salir del

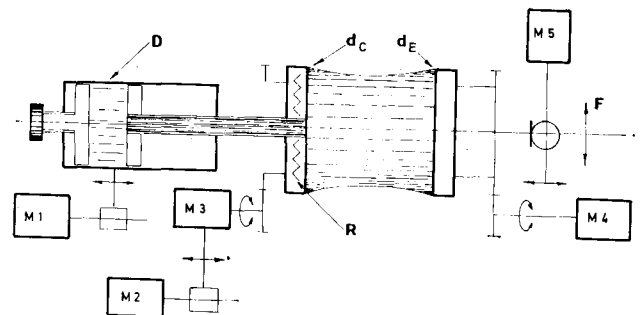


Fig. 12. Esquema de funcionamiento del FPM. D: Depósito del líquido de trabajo. d_c: Disco de alimentación. d_E: Disco de trabajo. F: Posicionador lateral del disco de trabajo. M₁: Motor para el desplazamiento axial del depósito D. M₂: Motor para el desplazamiento axial del disco de inyección. M₃: Motor para la rotación del disco de inyección. M₄: Motor para la rotación del disco de trabajo. M₅: Motor para la vibración axial del disco de trabajo. R: Resistencia eléctrica.

error recordar que Newton se basó en los cálculos astronómicos de Kepler para desarrollar la ciencia de la Mecánica, lo que facilitó en gran medida el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

Actualmente, el interés está centrado en los puntos siguientes:

- El medio interestelar y el origen del universo.
- Estructura de la Vía Láctea.
- Atmósfera solar y física del Sol.
- Física de la gravitación.
- Formación de estrellas.
- Radioastronomía.

El «Spacelab» irá equipado con varios telescopios y an-

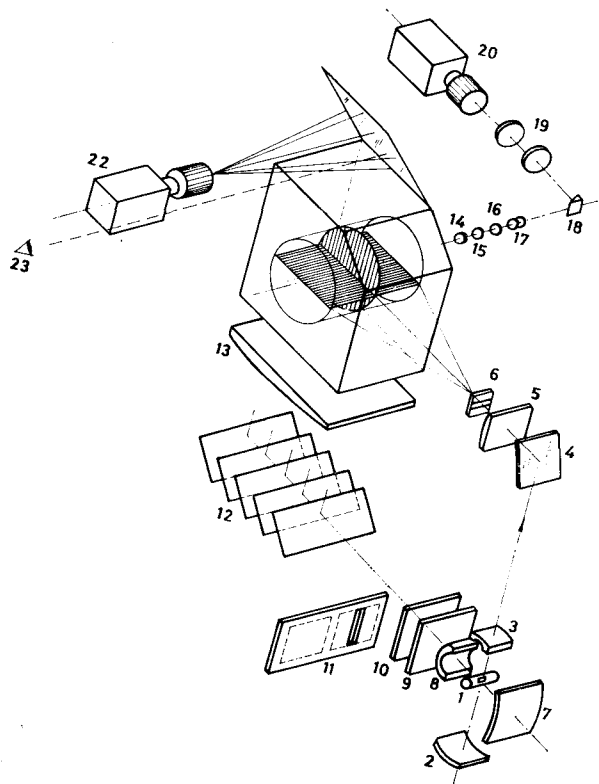


Fig. 13. Sistema de visualización y registro de imagen del FPM.

1. Lámpara.
- 2, 7. Espejos esféricos.
- 3, 8. Meniscos de Amici.
4. Espejo-filtro de infrarrojos.
- 5, 13. Lentes cilíndricas (de eje paralelo al eje de rotación).
6. Diafragma.
9. Filtro de infrarrojos.
10. Lente de Fresnel.
11. Filtro deslizante.
12. Caja de prismas.
14. Lente doble acromática.
15. Lente triplete.
16. Lente focal.
17. Lentes focales (para la corrección de desalineaciones debidas a vibraciones).
18. Prisma.
19. Lentes de enfoque.
- 20, 22. Cámaras.
21. Espejo.
23. Posición del operador.

tenas, adecuados al tipo de observaciones que se realizarán durante esta primera misión.

6. EL MÓDULO DE FÍSICA DE FLUIDOS DE LA PRIMERA MISIÓN

Como punto de unión entre la parte general de introducción a la investigación espacial y la contribución experimental española al Programa «Spacelab», se incluye esta descripción detallada de uno de los equipos disponibles para experimentación en Ciencias de los Materiales: el el Módulo de Física de Fluidos (FPM). Este Módulo servirá para realizar una amplia gama de experimentos en condiciones de gravedad reducida, donde se podrán ensayar masas líquidas confinadas por la tensión superficial (zonas flotantes, gotas...) o contenidas en recipientes. Un buen ejemplo de su aprovechamiento lo ofrece la serie de experimentos, resumidos en la Tabla 4, que se realizarán en el FPM durante el primer vuelo del «Spacelab» (para disminuir las interferencias del resto del «Spacelab», estos ensayos se harán al final de la misión, cuando ya hayan finalizado los demás).

Los trabajos de definición del Módulo comenzaron en 1975 con un anteproyecto de la empresa española Construcciones Aeronáuticas, S. A., en colaboración con el Laboratorio de Aerodinámica (Lamf) de la E.T.S.I. Aeroná-

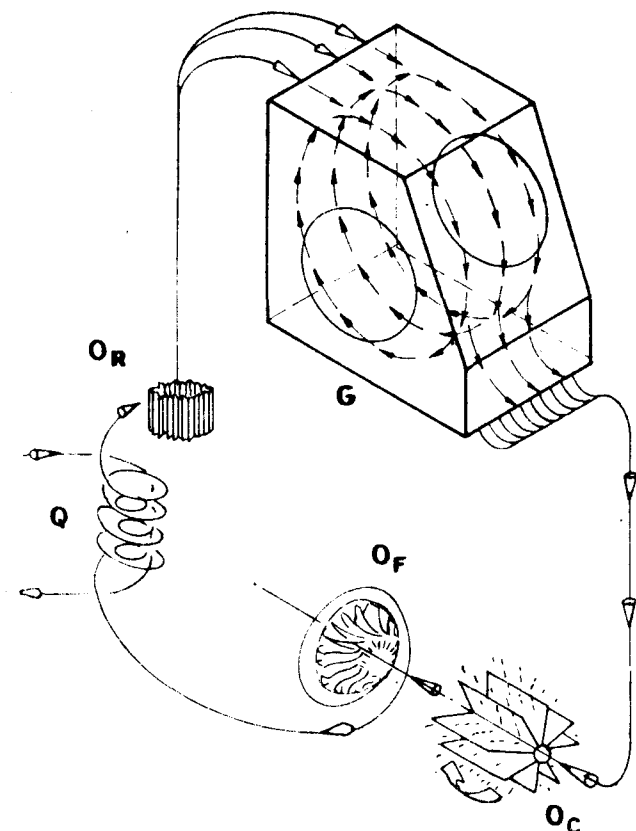


Fig. 14. Sistema de limpieza de la cámara de ensayos. O_C: Separador centrífugo. O_V: Ventilador. O_R: Filtro. G: Cámara de ensayos. Q: Cambiador de calor agua/aire.

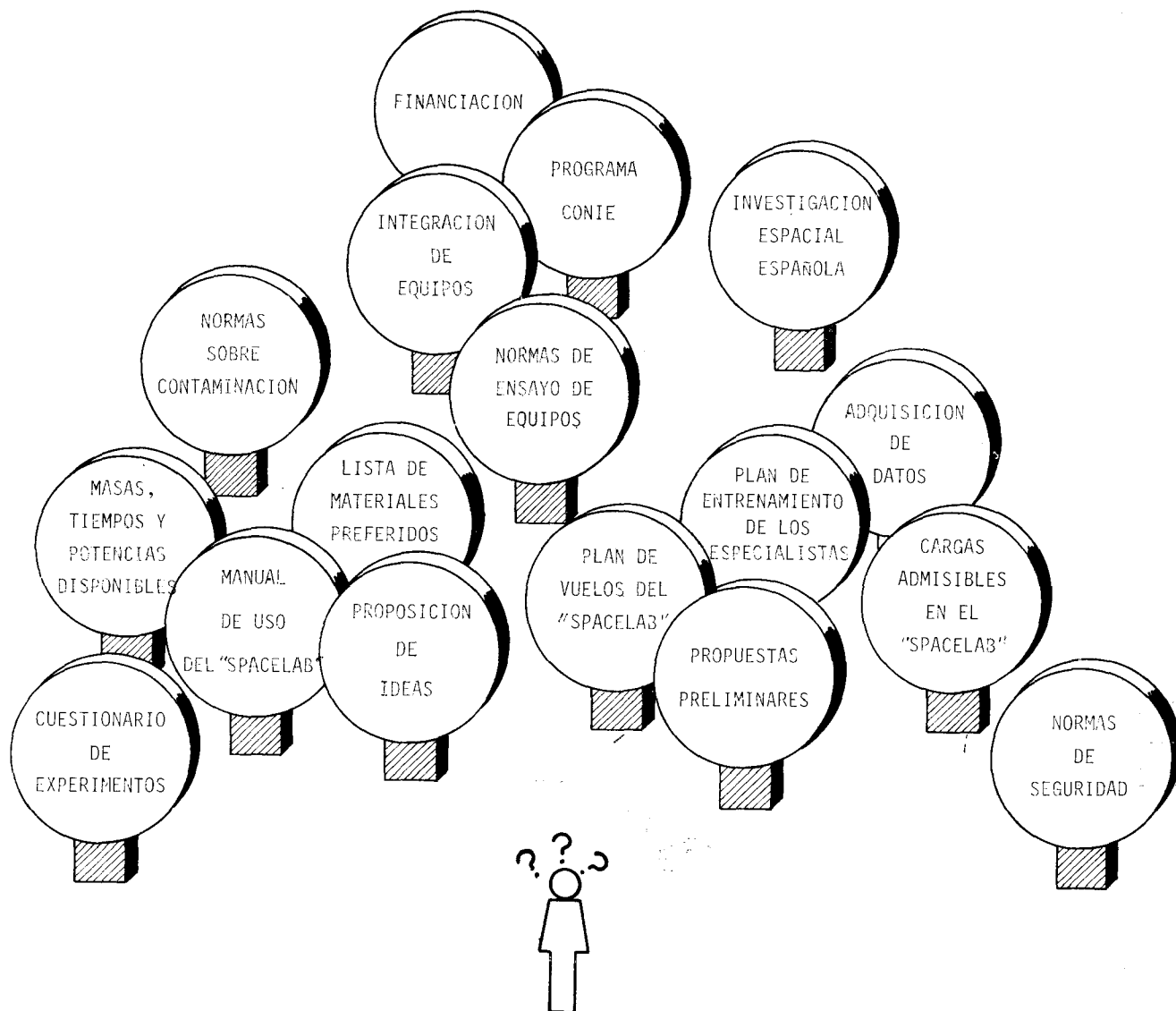


Fig. 15. El problema inicial del investigador que quiere realizar un experimento espacial es seleccionar la forma de actuación.

ticos. El proyecto definitivo y la construcción del FPM quedó después en manos de la empresa italiana FIAT y en la actualidad se está ultimando la puesta a punto del modelo de vuelo. En la fig. 11 (ver pág. 21) se muestra una visita del modelo de ingeniería, donde se puede observar la disposición adoptada para la integración de los distintos componentes.

El FPM consiste, básicamente, en un par de discos entre los que se puede colocar (inyectando a través de uno de ellos) una masa de líquido cuyo comportamiento se desea estudiar bajo la acción de las fuerzas de tensión superficial y de otros efectos impuestos (campos eléctricos, gradientes térmicos, etc.).

Uno de los discos (donde se realiza la inyección del líquido) puede desplazarse axialmente y girar tal como se esquematiza en la fig. 12; el otro (disco de trabajo) puede

desplazarse lateralmente, girar y vibrar axialmente. El disco de inyección lleva incorporada una resistencia eléctrica y ambos discos están aislados térmicamente; de esta forma es posible establecer gradientes de temperatura en la zona y diferencias de potencial entre los discos.

El Módulo de experimentación dispone también de un sistema de visualización y captación de imagen. La visualización se realiza por medio de trazadores sólidos (Ecospheres: microesferas huecas, de vidrio o cerámicas). El sistema de captación de imagen (fig. 13) permite registrar simultáneamente el campo de velocidades y la forma externa de una zona líquida en experimentación; la disposición de las cámaras de cine y el sistema de iluminación están diseñados de modo que una de las cámaras proporcione la visión en un plano meridiano (cámara B) y la otra en un plano paralelo a los discos (cámara A). Obvia-

mente, este sistema es el más crítico, pues toda la información sobre los experimentos deberá obtenerse de estas imágenes. En la actualidad, los mayores esfuerzos para mejorar el FPM están centrados en el perfeccionamiento de este sistema.

Además, el FPM lleva incorporado un sistema de limpieza de la cámara de ensayos mediante arrastre por aire (fig. 14), que también puede ser utilizado para enfriar la cámara tras un excesivo calentamiento debido al sistema de iluminación o al producido en algunos experimentos.

7. CONTRIBUCION ESPAÑOLA AL ESTUDIO DE LAS COLUMNAS LIQUIDAS FLOTANTES A BORDO DEL «SPACELAB»

El objetivo de la inclusión de esta parte específica en este trabajo de difusión general, es el de suministrar un ejemplo de posible actuación en la investigación espacial.

Empezar es lo difícil en cualquier actividad. Suponiendo que el investigador disponga ya de una primera idea sobre su investigación (interés científico y conveniencia de realización en el espacio) el panorama que se le presenta es desalentador por el exceso de información y lo confuso del proceso a seguir (fig. 15).

En nuestro caso (zonas líquidas flotantes), en 1974 y respondiendo a una Proposición de Ideas lanzada por la ESA, se remitió la primera versión de lo que más tarde, en 1976, pasaría a ser la propuesta formal de investigación experimental sobre el comportamiento de columnas líquidas en condiciones de ingravidez.

Paralelamente, se iniciaron las gestiones oportunas con la Comisión Nacional de Investigación del Espacio para proveer los fondos necesarios para el desarrollo de las investigaciones. Conviene comentar aquí que, aunque no se ha decidido todavía el procedimiento de financiación de las experimentaciones en el «Spacelab» posteriores al primer vuelo, parece previsible que continúe la misma norma; esto es, la Agencia Europea será la encargada de la organización y control de los vuelos (sola o en colaboración con la NASA), proporcionando además los equipos de utilización compartida (ya se ha creado un Banco de Equipos Generales). Por otra parte, la financiación de aparatos específicos y de todo el soporte en Tierra (investigaciones teóricas, reuniones internacionales, etc.) corresponderá a los organismos nacionales de investigación.

El experimento propuesto fue seleccionado por la Agencia y codificado como 1-ES-331 con el título: «Estabilidad de las zonas flotantes», para ser realizado junto con otros cinco (ver Tabla 4) en el Módulo de Física de Fluidos durante el primer vuelo del «Spacelab» en 1982.

En 1978 se abrió el turno de presentación de propuestas para los vuelos siguientes (ver Tabla 1) y se ha solicitado la continuación y ampliación de los ensayos con zonas líquidas flotantes (Propuesta de Experimentación A06/170/E/MS-III/704-Floating Zone Hydrodynamics). Como ya se indicó en la Introducción, esta es la única solicitud española que se ha recibido, de momento, en la Agencia.

7.1. INTERES CIENTIFICO

El objetivo perseguido con estas investigaciones es el conocimiento teórico y práctico de la hidromecánica de las zonas líquidas flotantes. El interés de esta experimentación reside en la amplia utilización prevista de di-

chas zonas en el estudio de fenómenos tales como el crecimiento de monocristales, fuerzas de interacción molecular, electroforesis, etc., estudios necesarios para el desarrollo de procesos de producción de materiales en el espacio en los que las empresas electrónicas, metalúrgicas y farmacéuticas están muy interesadas.

7.2. RELEVANCIA ESPACIAL

Este estudio requiere la utilización de zonas líquidas flotantes macroscópicas durante tiempos de varias decenas de minutos. Zonas tan grandes (130 mm. por 60 mm. de diámetro) sólo pueden obtenerse en condiciones de microgravidad, ya que en Tierra las fuerzas hidrostáticas empiezan a vencer las fuerzas de tensión superficial para zonas de más de unos milímetros, siendo imposible mantener el líquido sin paredes (los procedimientos de levitación electromagnética o electroacústica son muy restrictivos).

Existen diversos procedimientos de obtener gravedad reducida: caída libre en torres de vacío, caída libre desde globos estratosféricos, vuelo parabólico de aviones, cohetes de sondeo y naves orbitales. De todos ellos, el único que permite tiempos de utilización tan grandes como los requeridos es el vehículo orbital. La disponibilidad de un laboratorio espacial tripulado hace posible esta experimentación en condiciones favorables y seguras. Se podría pensar en tratar de simular la ingravidez mediante inmersión en un baño isométrico, o minimizar el efecto de la gravedad actuando a escala microscópica (décimas de milímetro), pero todos estos procedimientos resultan inadecuados.

7.3. REQUISITOS

Además de un alto interés científico, para que un experimento en un laboratorio espacial sea realmente factible, es necesario que imponga los menores requisitos, por lo que desde un principio se han tenido en cuenta los puntos siguientes:

— *Simplicidad.* El costo y la fiabilidad de la experimentación son proporcionales a la complejidad de los equipos y su manejo. Deben utilizarse, siempre que sea posible, instrumentos de uso general disponibles en el banco de equipos de la Agencia. Afortunadamente, este Laboratorio colaboró en la fase de definición y prediseño del Módulo de Física de Fluidos, aprovechando tal ocasión para dotar al FPM de los elementos convenientes a nuestra experimentación.

— *Compatibilidad.* Compartir instalaciones y manejo es dividir los costos individuales y aumentar el mérito global del conjunto de experimentos que utilizan los mismos equipos. Fomentar esta actitud de cooperación y beneficio mutuo es uno de los principios de la Agencia. Un claro ejemplo lo proporciona el Módulo de Física de Fluidos, en el que, en el primer vuelo, van a desarrollar sus experimentos seis grupos de investigación europeos.

7.4. FINANCIACION

En general, en la fase inicial es muy difícil conseguir una financiación total de las investigaciones propuestas. En nuestro caso, gran parte de los gastos de la investigación están sufragados por la Comisión Nacional de Investigación del Espacio, pero existen otros caminos, como la industria, la Fundación Universidad-Empresa, la Universi-

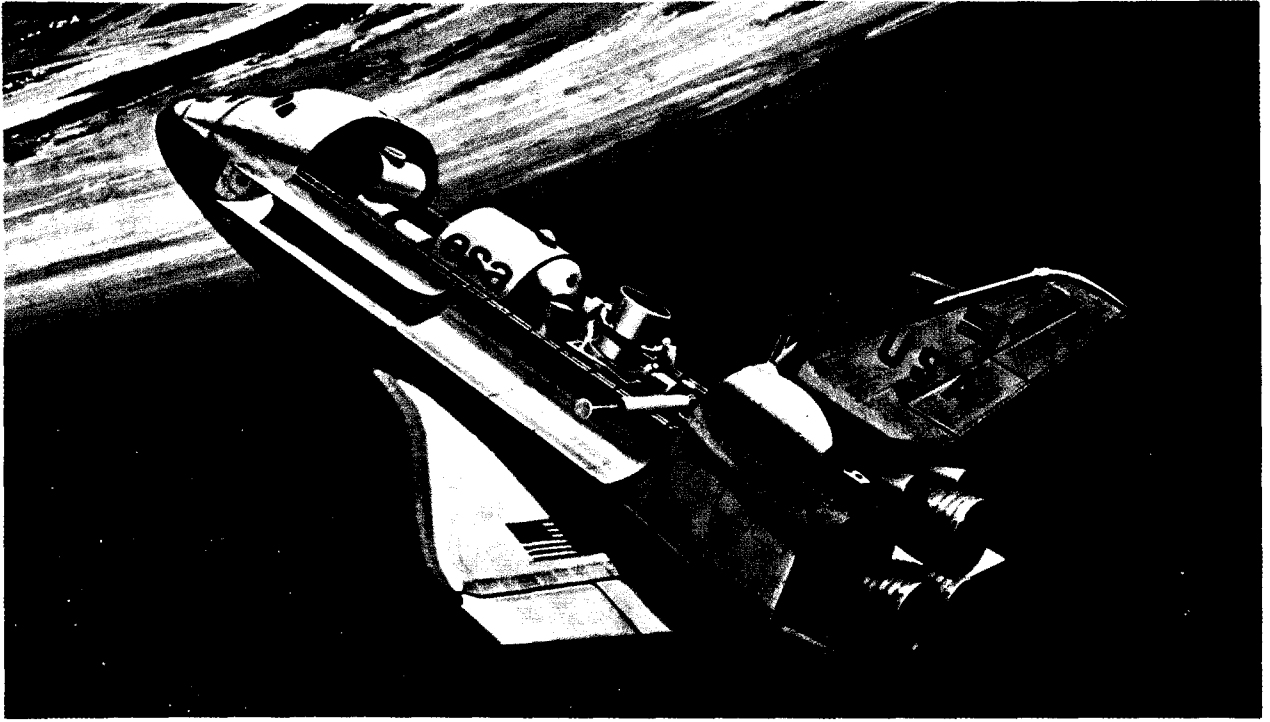


Fig. 3. Vista artística del conjunto «Orbiter» (USA) - «Spacelab» (ESA).

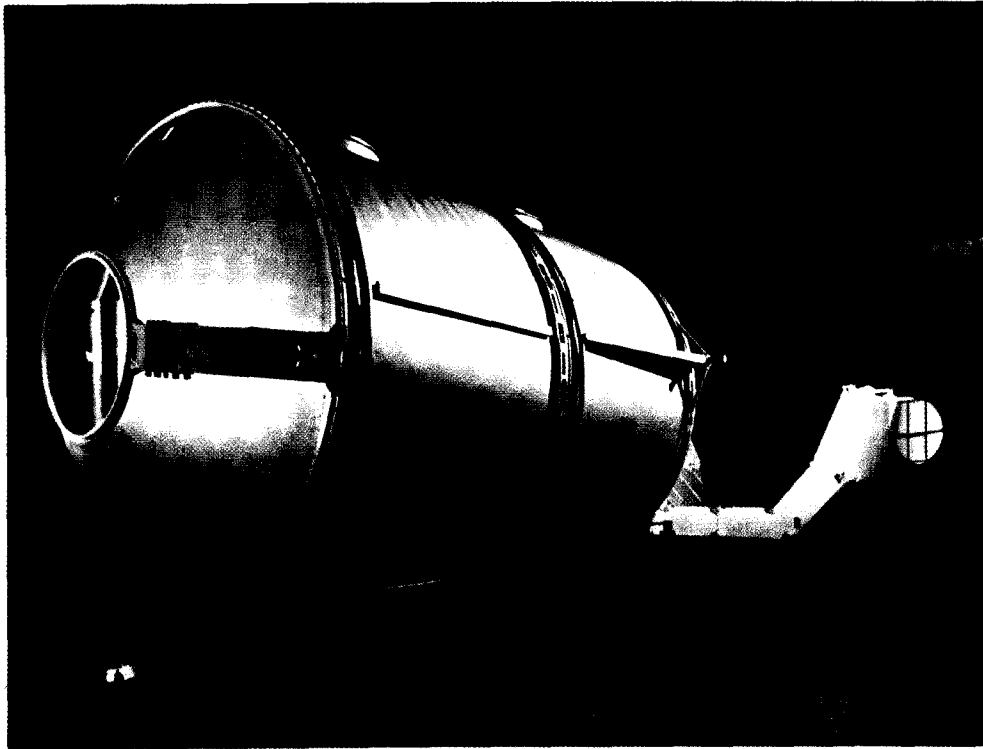


Fig. 6. Vista exterior de una maqueta del «Spacelab».

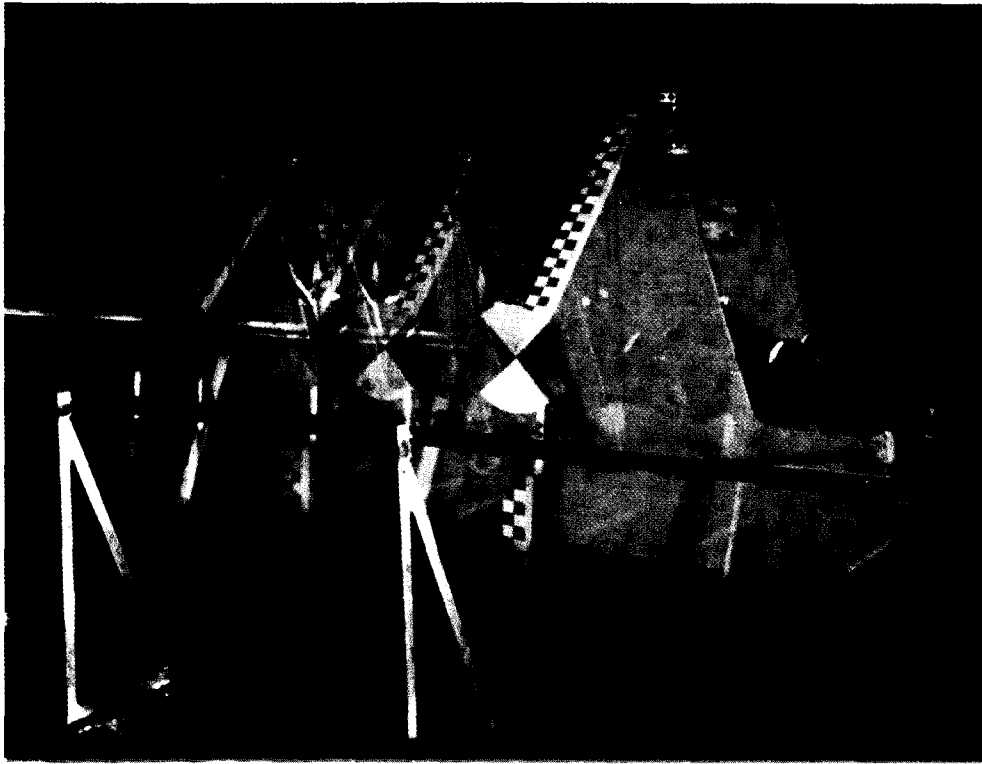


Fig. 9. Asiento móvil (desplazable sobre raíles) para investigación médica sobre el órgano vestibular.

dad y otros organismos oficiales. Como ejemplo, he aquí un resumen económico de esta experiencia.

- 1974: Estudio de posibilidades. Sin financiación. Petición de ayuda.
- 1975: Anteproyecto. Subvención de 250.000 pesetas.
- 1976: Desarrollo. Aprobación por la ESA y aceptación de financiación por parte de la CONIE. Contrato de 900.000 pesetas.
- 1977: Desarrollo. Contrato de 1.500.000 pesetas.
- 1978: Desarrollo. Contrato de 3.400.000 pesetas.
- 1979: Desarrollo. Contrato de 3.000.000 de pesetas.

Los gastos que cubren estos contratos son: adquisición de equipos de cálculo e instrumentación, publicaciones, viajes a reuniones y congresos, adquisición de libros y suscripciones, gastos de mantenimiento de equipos específicos y nómina de personal.

8. ESTUDIOS TEORICOS PREPARATORIOS

El estudio del comportamiento de zonas líquidas en condiciones de ingravidez se inició en 1975 redactando un plan general de investigación, buscando la bibliografía relacionada con el tema y haciendo una evaluación de los problemas de mayor importancia.

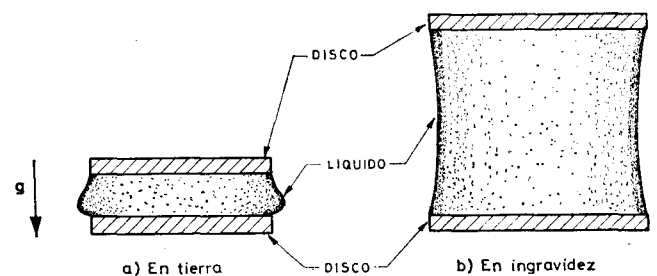
En 1976 se empezó con el análisis de las formas de equilibrio axilimétricas de las zonas líquidas comprendidas entre dos discos coaxiales. Las soluciones «exactas» fueron obtenidas numéricamente, utilizándose el procedimiento de diferenciación paramétrica, lo que sirvió de guía para abordar el problema de la estabilidad de las zonas cilíndricas.

Durante ese mismo año se preparó una realización cinematográfica en dibujo animado, titulada «Floating Zone», sobre el comportamiento previsible de las zonas flotantes. Esta película, junto con un par de artículos sobre el tema, fueron presentados en el II Simposio de Ciencia de los Materiales en el Espacio, organizado por la Agencia Espacial Europea en Frascati (Italia).

En 1977 se continuó el trabajo sobre las formas de equilibrio añadiendo nuevos efectos, se desarrolló el análisis estático (que ha dado lugar a una Tesis Doctoral) y se acometió uno de los problemas clave de la dinámica de las zonas flotantes: el movimiento del fluido en las proximidades del borde de los discos. Ambas contribuciones se presentaron respectivamente en la XX Asamblea Plenaria de la COSPAR (Tel-Aviv, junio 1977) y el XXVIII Congreso Astronáutico Internacional de la IAF (Praga, septiembre 1977).

En 1978 se abordó el problema de la puesta en rotación, dedicando asimismo un gran esfuerzo teórico y experimental al análisis de los efectos del manejo por el astronauta

Fig. 16. Formas típicas de zonas líquidas en Tierra y en el espacio.



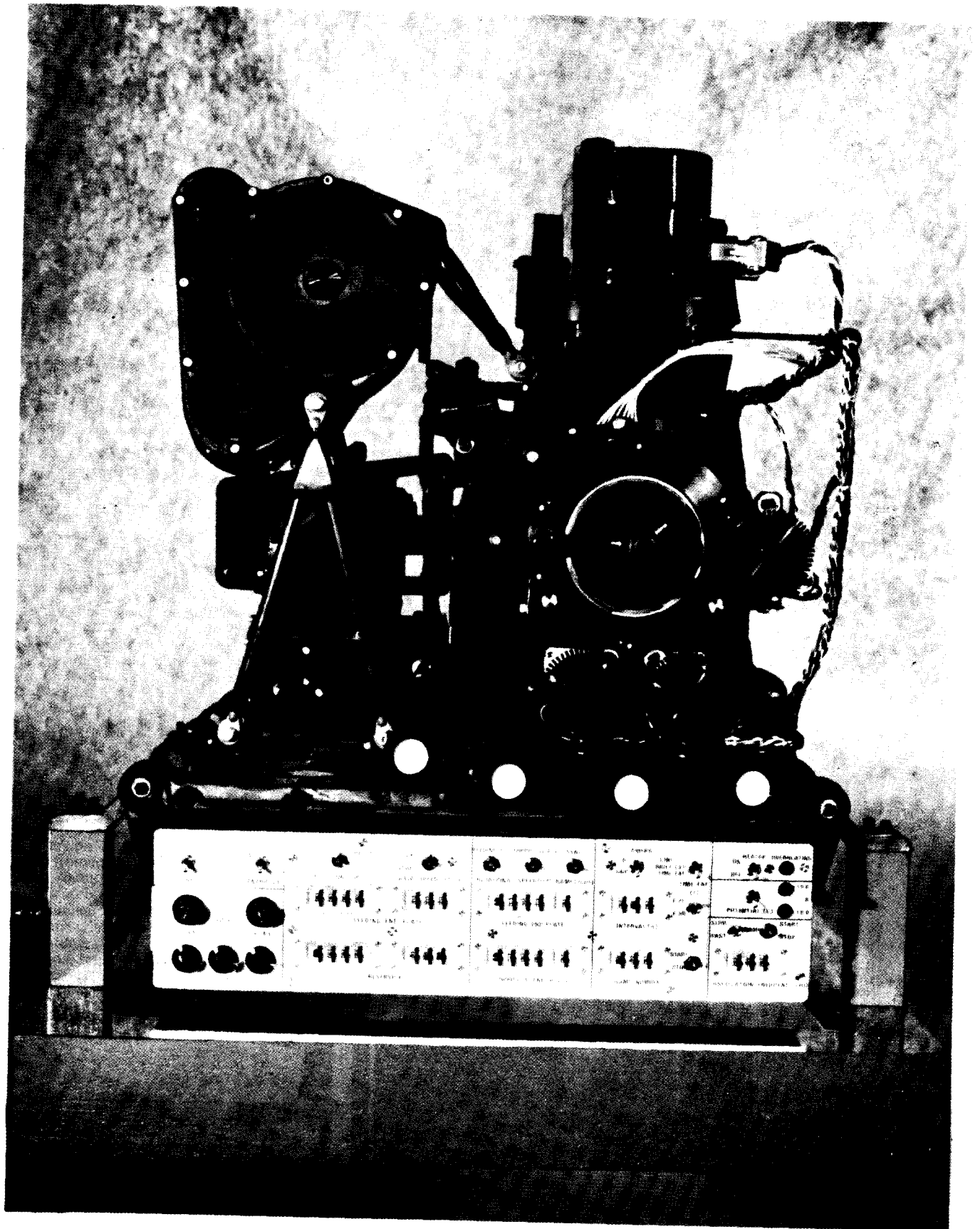


Fig. 11. FPM. Modelo de ingeniería.

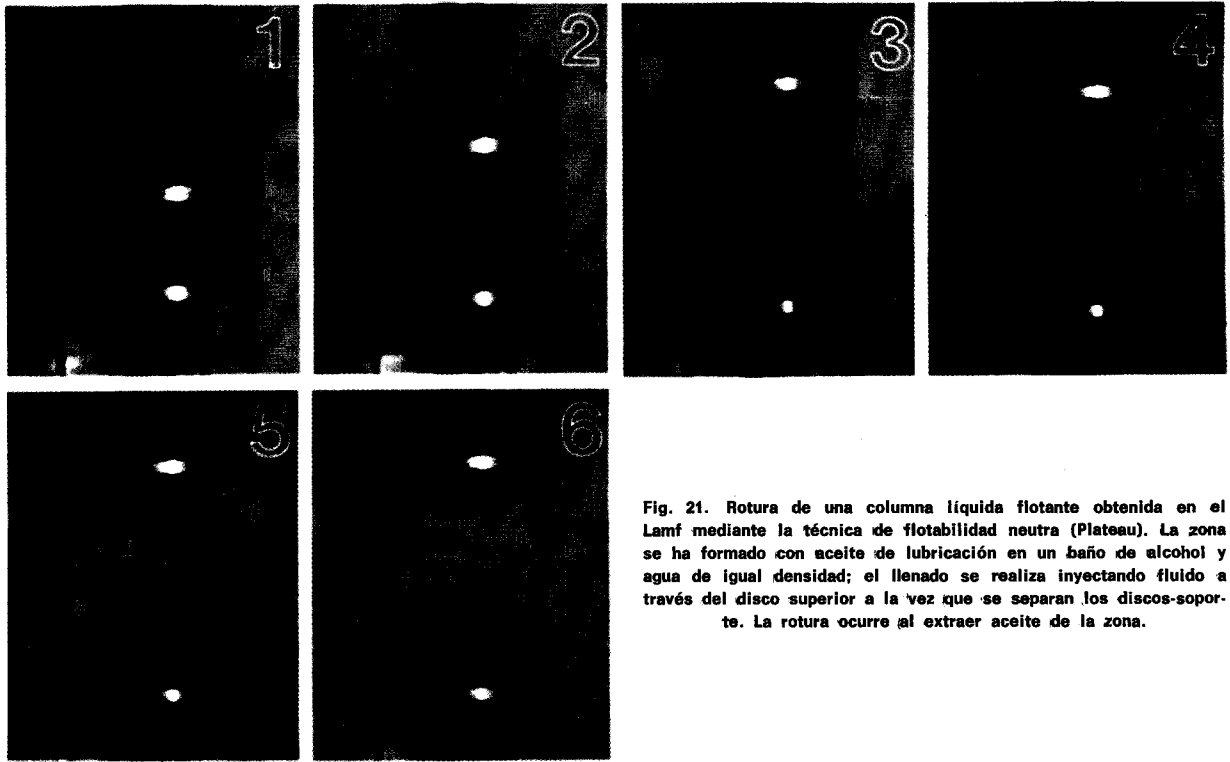


Fig. 21. Rotura de una columna líquida flotante obtenida en el Lamf mediante la técnica de flotabilidad neutra (Plateau). La zona se ha formado con aceite de lubricación en un baño de alcohol y agua de igual densidad; el llenado se realiza inyectando fluido a través del disco superior a la vez que se separan los discos-sopor-
te. La rotura ocurre al extraer aceite de la zona.

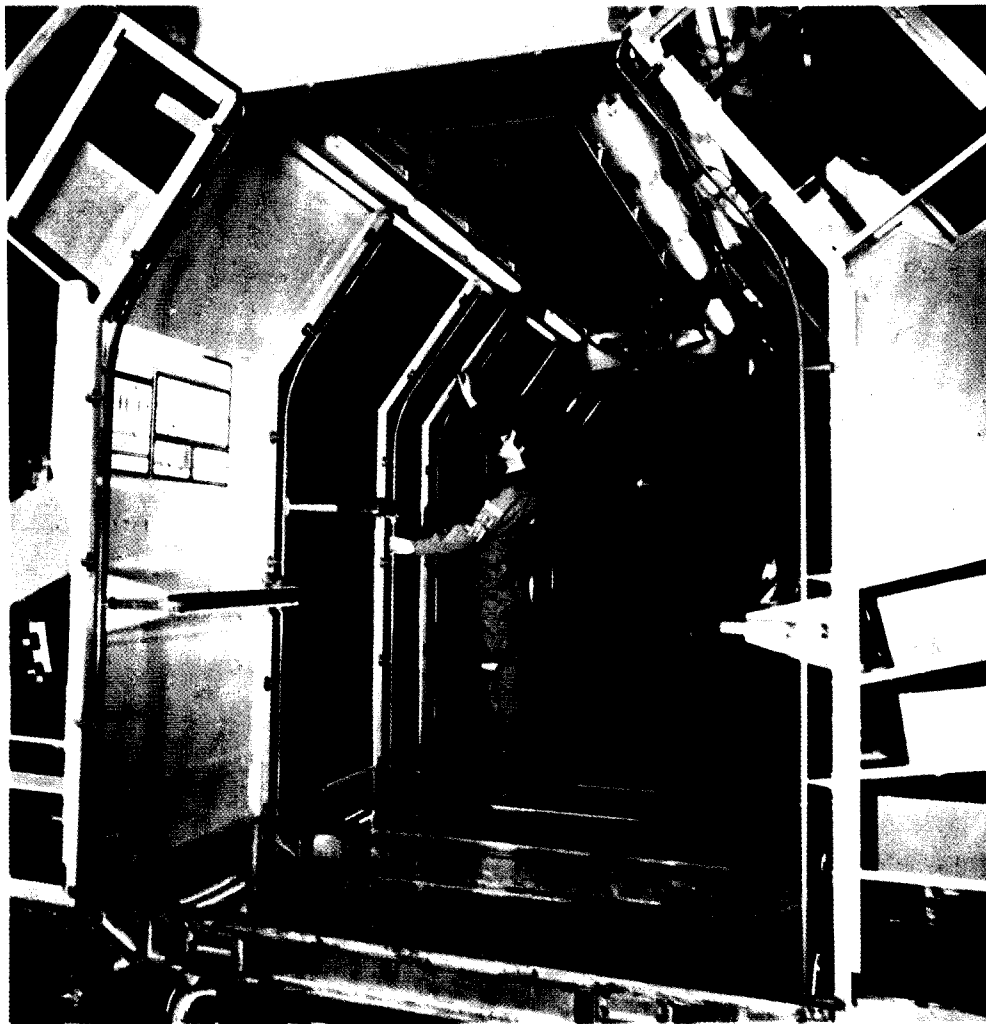


Fig. 23. Vista del interior de una maqueta del «Spacelab».

Fig. 17. Límites de la estabilidad del equilibrio de una zona líquida flotante de volumen V mantenida entre discos de diámetro D separados una distancia L . El límite \cdots corresponde a la hipótesis de desbordamiento o deslizamiento. — Corresponde a la rotura del puente fluido. La rotura es simétrica para zonas con $L/D < 2$ (Punto A) y no simétrica para zonas con $L/D > 2$.
 \cdots Primer ensayo. $\cdots\cdots$ Segundo ensayo.

sobre la zona líquida, con el fin de asegurar un llenado suave y seguro y una limpieza efectiva, ya que los ensayos son extraordinariamente sensibles a la contaminación. Además, se ampliaron los campos de estudio, comenzando el análisis de los problemas de imágenes, trazadores, visualización y otros problemas relacionados con la experimentación en el «Spacelab».

8.1. CONDICIONES DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE ZONAS FLOTANTES

Cuando se mantiene una masa líquida entre dos placas sin paredes laterales, la forma de la superficie libre (para líquido que moja bien) es del tipo representado en la fig. 16, donde se aprecia la influencia de la gravedad terrestre: zonas deformadas y de muy pequeña altura.

En condiciones de ingravidez, para que una masa líquida permanezca entre dos discos iguales y coaxiales se deben cumplir ciertas condiciones. El volumen de líquido no puede ser ni muy pequeño (se estrangularía el puente y quedarían dos gotas separadas, una en cada disco) ni demasiado grande (el líquido se desbordaría por las paredes laterales de los discos). En la fig. 17 se muestran estas limitaciones.

La fig. 18 es un resumen completo del estudio hidrostático de la zona flotante.

En la práctica, el mayor campo de aplicación de las columnas líquidas es, hoy día, el crecimiento de cristales puros, que se realiza según se esquematiza en la fig. 19. La fusión de la zona se consigue por algún procedimiento electromagnético local, utilizando una bolsa de inducción que rodea toda la zona, o mediante radiación láser (mucho más efectiva y simple), pero en cualquier caso conviene comunicar un ligero movimiento de rotación a la columna de material (girando los soportes) para homogeneizar temperaturas. Basándose en este hecho, en nuestro estudio hemos tenido en cuenta el efecto que una velocidad de rotación uniforme tendría sobre la forma de equilibrio y la estabilidad de nuestro modelo de zona líquida flotante, y el

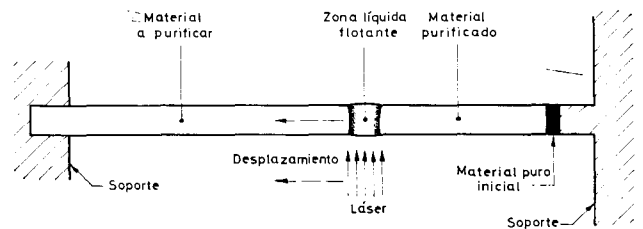
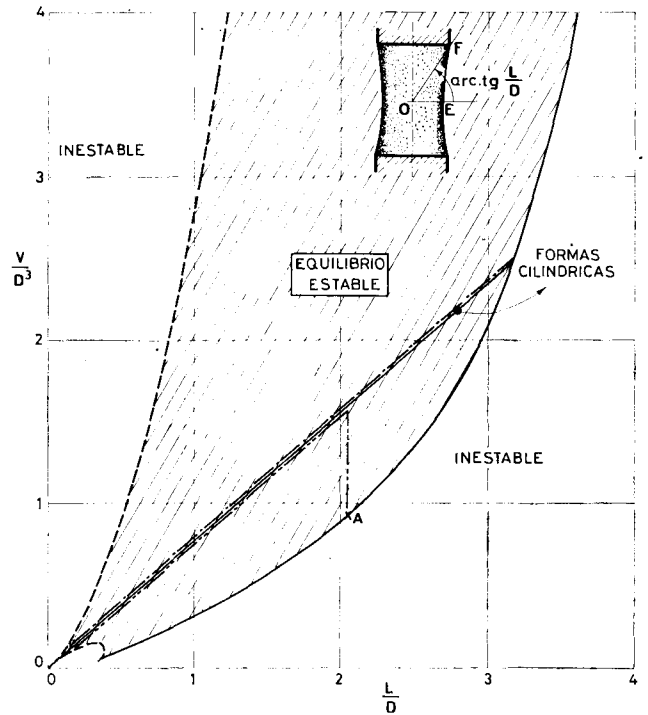


Fig. 19. Esquema de purificación de materiales mediante la técnica de la zona flotante.

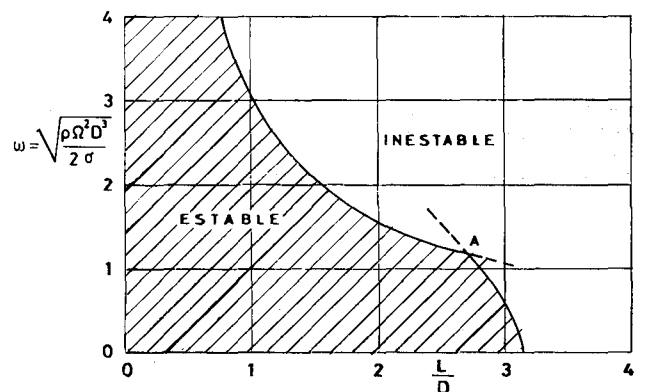


Fig. 20. Reducción del límite de estabilidad de una zona cilíndrica por efecto de la rotación a velocidad angular Ω . Para Ω grandes (a partir del punto A) aparece un nuevo modo de rotura: el modo C o en comba.

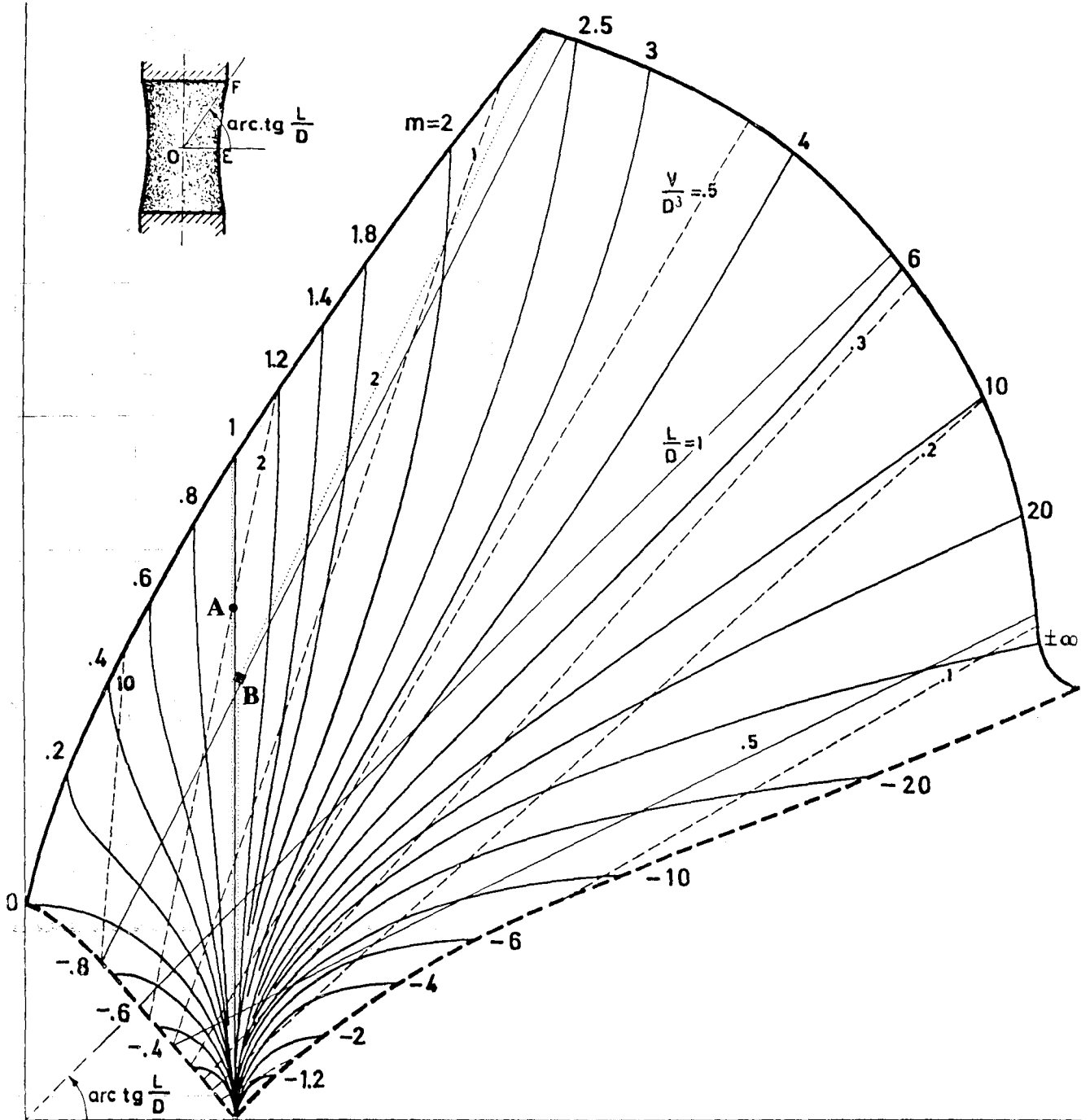


Fig. 18. Resumen de la hidrostática de las zonas flotantes. Para un diámetro de los discos soporte D , una separación entre ellos L , y un volumen de líquido V , se obtiene un punto en la figura, que (según se detalla) determina la forma de la superficie libre. Las evoluciones casiestacionarias a volumen o longitud constantes se van siguiendo a lo largo de las curvas $V/D^3 = \text{cte.}$ o $L/D = \text{cte.}$, respectivamente. Al llegar al límite de estabilidad la zona se rompe. Sucesión de estados de equilibrio a seguir en los dos primeros experimentos en el «Spacelab» (A, ensayo 1; B, ensayo 2).

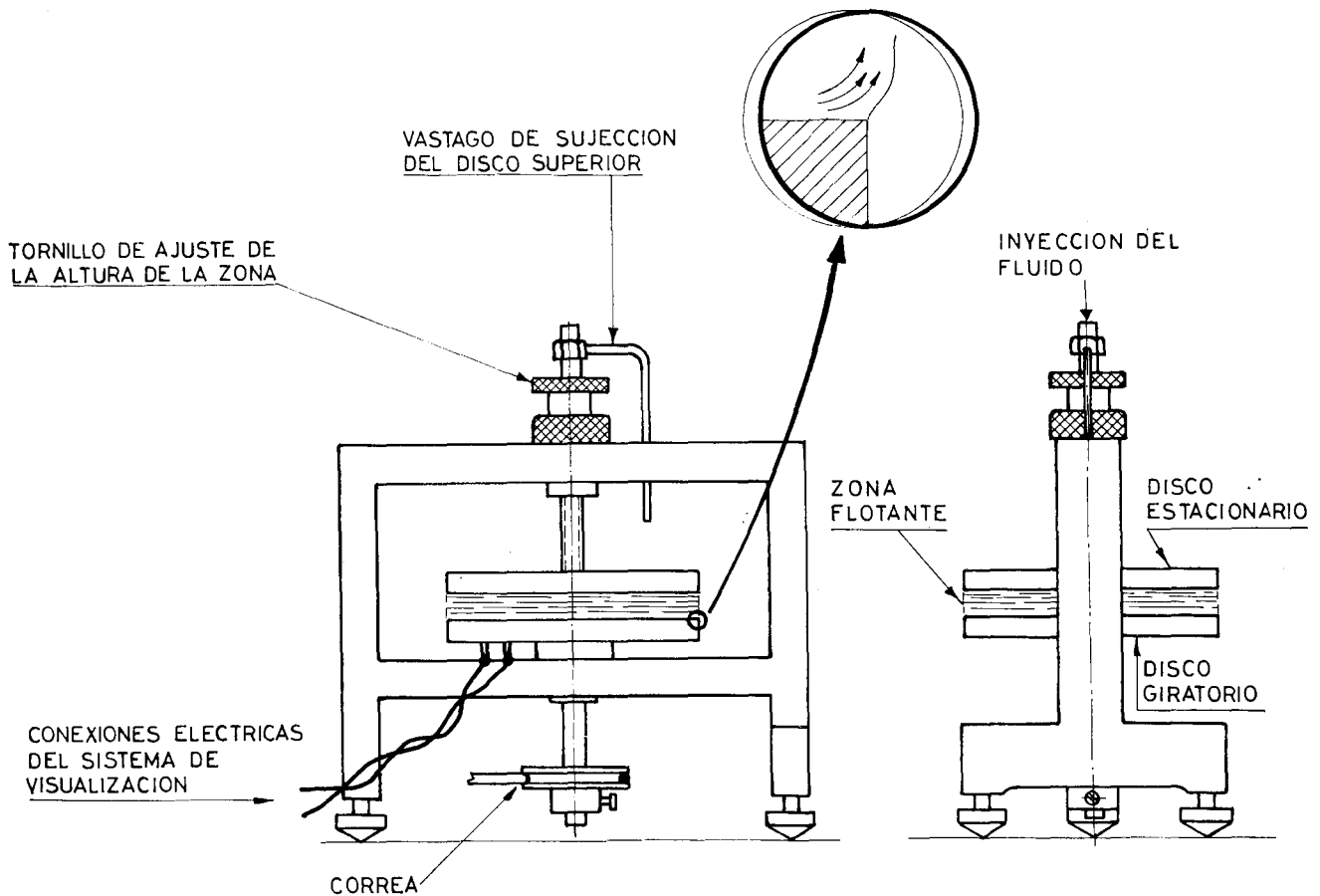


Fig. 22. Mesa giratoria para la experimentación con zonas flotantes en Tierra.

resultado es que, aunque la forma de la zona apenas cambia, la estabilidad disminuye e incluso puede aparecer un nuevo modo de rotura (particular de las zonas giratorias): el modo en comba. En la fig. 20 se muestra este efecto sobre las zonas cilíndricas.

Además de estos estudios sobre la hidrostática de las zonas líquidas flotantes, se han iniciado numerosos análisis hidrodinámicos: respuesta a vibraciones, inestabilidades en la inyección, movimiento en las proximidades de los bordes de los discos, capas límites en los discos y otros.

9. EXPERIMENTOS PREPARATORIOS

Los ensayos con zonas líquidas flotantes comenzaron a principios de 1976 con un ligero desfase respecto a los análisis matemáticos impuesto por la conveniencia de un mínimo soporte teórico.

La experimentación con columnas líquidas en la superficie terrestre es extremadamente difícil; las fuerzas gravitatorias son dominantes frente a las de tensión superficial y, en consecuencia, los efectos de la tensión superficial son prácticamente inapreciables, salvo en zonas pe-

queñas, en general de dimensiones no superiores a unos pocos milímetros.

El primer trabajo consistió en seleccionar y filmar experimentos simples dominados por la tensión superficial para el cortometraje «Floating Zone» que constituyen la introducción a los resultados teóricos que posteriormente se muestran en la película. De entre estos experimentos, uno de particular atractivo: el de flotabilidad neutra (fig. 21, ver pág. 22). Por este método, consistente en sumergir un líquido en otro de igual densidad e inmiscible con el primero, se pueden formar zonas flotantes de gran esbeltez que permiten el estudio cualitativo del comportamiento de las mismas frente a una amplia gama de perturbaciones. Desgraciadamente, la presencia del otro líquido falsea las condiciones en la interfase, por lo que esta técnica no es adecuada para el estudio de fenómenos dinámicos en zonas flotantes.

Durante el año 1977 se iniciaron los estudios dinámicos de la zona flotante. Como primer paso se eligió el caso del movimiento inducido por la rotación instantánea de uno de los discos a partir de una zona inicialmente en reposo, construyéndose una mesa giratoria para comprobar experimentalmente los resultados obtenidos. La mesa, según el esquema de la fig. 22, posee dos discos de 10 cm. de diámetro; el superior puede desplazarse axialmente y el inferior se conecta mediante una correa un

motor eléctrico de gran precisión (no representado en la figura). Con este dispositivo se pueden formar columnas líquidas de unos 3 ó 4 mm. de altura, que es la máxima altura alcanzable con agua en la superficie terrestre.

El fin de los ensayos era registrar el movimiento del fluido próximo al disco móvil y situado cerca de la superficie libre, durante el inicio de la rotación (aproximadamente durante el primer medio segundo), tiempo hasta el que se estimaban válidos los resultados teóricos. Para ello se dispuso un método de visualización mediante el cambio de pH, utilizando una solución acuosa de Azul de Timol adecuadamente tratada; al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos impresos en el disco giratorio se forman zonas puntuales coloreadas que sirven como trazadores del movimiento (esta técnica presenta la ventaja de su limpieza, pues al cabo de un breve tiempo se restablecen las condiciones primitivas, desapareciendo toda traza del colorante).

Los ensayos fueron un éxito en el manejo, tanto de zonas flotantes no confinadas como del sistema de visualización; no ocurrió así desde el punto de vista de comprobación de resultados teóricos, pues, primeramente, el diámetro de los discos resultó ser insuficiente (las desviaciones de la trayectoria circular son proporcionales al diámetro) y en segundo lugar, se formaban pequeñas burbujas de hidrógeno en el disco inferior que, al ascender por flotabilidad, arrastraban el colorante haciendo imprecisa la altura de la zona trazada.

Para corregir estos defectos, actualmente se está construyendo en los talleres del Lamf una segunda mesa giratoria de mayores dimensiones, en cuyo diseño se han corregido los defectos señalados (en particular, la visualización se hará sobre el disco superior, eliminando así los efectos de flotabilidad), ofreciendo también la posibilidad de ensayar zonas de gran esbeltez utilizando la técnica de flotabilidad neutra.

10. ENTRENAMIENTO DE LOS ASTRONAUTAS

Para algunos experimentos (medicina) los astronautas son sujetos pacientes y, por tanto, parte constitutiva de los mismos. Para los demás, la intervención de los astronautas es la solución a inacabables problemas de logística. Muchos de estos experimentos se podrían diseñar para que funcionasen automáticamente, pero a costa de que la secuencia se interrumpiese (o continuase fuera de control) ante cualquier imprevisto; sólo la insustituible capacidad de respuesta del elemento humano frente a sucesos inesperados ofrece las requeridas garantías de fiabilidad.

El ambiente espacial impone una serie de cargas físicas y psíquicas a los astronautas: mareos, somnolencia, agotamiento, claustrofobia, tensión nerviosa, etc. Los individuos que vayan a trabajar en el laboratorio espacial deberán estar preparados para afrontar este esfuerzo a través de un programa de entrenamiento y acomodación. Desafortunadamente, los vuelos espaciales son tan costosos que no es posible aún que cada investigador vaya allí a realizar personalmente sus experimentos, por lo que resulta obligado confiar en especialistas: personal seleccionado entre la comunidad científica interesada que sufrirá un proceso de preparación y entrenamiento psicofísico-científico. El éxito de la experimentación depende en gran parte del entrenamiento de la tripulación.

La primera misión «Spacelab» tiene asignada una tripu-

lación de seis personas: comandante, piloto, dos sobrecargos y dos especialistas, los cuatro primeros pertenecientes al Cuerpo de Astronautas de la NASA y los dos últimos, uno europeo y otro americano, reclutados entre las comunidades científicas de Europa y USA.

Por parte europea se han seleccionado para especialistas tres candidatos (de nacionalidad suiza, alemana y holandesa), que junto a otros dos norteamericanos seguirán un programa especial de entrenamiento. De este programa, la NASA se ocupará del entrenamiento de los candidatos como astronautas, quedando bajo la responsabilidad de la ESA la formación de los mismos en las funciones específicas de la misión; en consecuencia, para el primer vuelo del «Spacelab», ESA/SPICE (Spacelab Payload Integration and Corporation in Europe) se encargará de la formación y entrenamiento de los candidatos en los aspectos científicos de la misión. El programa preparado por ESA/SPICE comprende las siguientes fases:

- 1.ª Estudio de la literatura relacionada con los experimentos para una familiarización con los objetivos científicos de cada uno de ellos.
- 2.ª Formación teórica, dirigida por los investigadores, seguida de discusiones sobre los experimentos entre los candidatos y los investigadores.
- 3.ª Visitas a algunos laboratorios con el fin de habituar a los candidatos con el equipo básico de los experimentos y con los instrumentos que deberán manejarse en órbita.
- 4.ª Entrenamiento global en su simulador pasivo.
- 5.ª Participación en las actividades de integración del «Spacelab», seguido de ejercicios de simulación de la misión.

Cumpliendo este programa se seleccionarán los especialistas, uno entre los tres europeos y otro entre los dos americanos.

Durante el vuelo, los especialistas estarán asistidos por los sobrecargos (responsables de la coordinación de todo el equipo soporte suministrado por el «Orbiter» y «Spacelab» a los experimentos) que habrán realizado previamente un entrenamiento para, eventualmente, colaborar en la realización de ciertos experimentos, contando además con la ayuda de un ordenador para el conjunto de experimentos, que será el medio a través del cual se mostrará a los especialistas la información requerida (aparte de servir como órgano de mando, o como controlador automático de aquellos experimentos que requieren poca o ninguna intervención manual) y con la ayuda del Centro de Control (Payload Operation Control Centre, POCC), que recibirá, en tiempo real, todos los datos de los experimentos mientras el laboratorio espacial se encuentre dentro de la cobertura del sistema de comunicaciones (60 por 100 del tiempo total), estos datos serán procesados por los equipos de Tierra y su análisis permitirá a aquellos investigadores que durante el tiempo de la misión se encuentren en el POCC, controlar parcialmente sus ensayos directamente por telemando o bien comunicando oralmente sus instrucciones a los especialistas del «Spacelab». Para la primera misión el POCC estará en Houston, pero para las posteriores misiones europeas estará en Alemania.

Acabado el vuelo orbital, los investigadores recibirán la información registrada durante la realización de sus experimentos, de la que deberán obtener sus conclusiones.

En la fig. 23 (ver pág. 22) se muestra una maqueta a escala del interior del «Spacelab».