

COLUMNAS LIQUIDAS EN  
CONDICIONES DE INGRAVIDEZ

INFORME FINAL 1980  
VOLUMEN 1

Lamf-ETSIA, Laboratorio de Aerodinámica,  
E.T.S.I.Aeronáuticos, Ciudad Universitaria,  
Madrid-3

EXPEDIENTE CONIE 433/80

Madrid, Diciembre 1980

Ref.: Lamf 8012/c



## MEMORIA

La Comisión Nacional de Investigación del Espacio viene subvencionando, desde 1975, las investigaciones teóricas y experimentales que en este Laboratorio se realizan sobre el comportamiento fluidodinámico de masas líquidas suspendidas, en gravedad reducida, por fuerzas de tensión superficial.

Durante este año de 1980 se ha desarrollado una gran actividad: estudios teóricos, construcción y puesta a punto de equipos de ensayo, asistencia a congresos y reuniones internacionales, publicación de trabajos especializados y de difusión, etc.

En Abril participamos en la 3<sup>a</sup> Conferencia sobre Hidrodinámica Fisicoquímica, celebrada en Madrid, en la que se presentó el artículo:

Da-Riva, I. & Manzano, D.R., "Impulsive Motions of the Floating Zone". Europhysics Conference Abstracts, Vol. 3F, 1980.

En Julio se desplazaron a ESTEC (Holanda) varios miembros del equipo para llevar a cabo ensayos de calificación en el Modelo de Ingeniería del Módulo de Física de Fluidos, asistidos por ingenieros de la empresa constructora y técnicos de ESTEC. Durante diez días se realizaron cuidadosos ensayos con el nuevo equipo para detectar posibles defectos de funcionamiento. Solapando con estos experimentos, tuvo lugar una sesión de entrenamiento de los futuros astronautas del Spacelab que tendrán a su cargo los ensayos en vuelo.

En Agosto tuvo lugar en Alpbach (Austria) un Curso de Verano sobre Investigaciones en Microgravedad, donde se dieron a conocer estos trabajos a jóvenes científicos europeos, centrandose

nuestra aportación en la enseñanza de las formas de equilibrio y la estabilidad de las zonas líquidas flotantes.

En Septiembre se asistió en Tokio al 31º Congreso de la International Astronautical Federation (IAF), presentando el artículo:

Da-Riva, I., "Stability of Liquid Bridges". Próxima publicación en Proceedings of the IAF.

En otro orden de actividades, queremos resaltar el enorme esfuerzo realizado en el diseño y construcción de un complejo aparato para la experimentación de zonas flotantes en baño neutro: el PTF (Plateau Tank Facility). Con este equipo, con el que se han puesto a prueba las limitadas posibilidades de nuestros talleres, esperamos poder disponer de un valiosísimo útil de trabajo para los próximos años, tanto para las investigaciones sobre estabilidad y rotura como para las de movimientos internos.

También merecen mención especial los trabajos de cálculo numérico y de presentación de gráficos en pantalla de ordenador, donde se han conseguido excepcionales resultados.

Por último, juzgamos de gran utilidad la colaboración con la CONIE en la difusión y promoción a nivel nacional de estas investigaciones en aras a una mayor rentabilidad del esfuerzo realizado. En este sentido, se han publicado sendos artículos de divulgación en las revistas Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica (nº 205) y Ciencia y Pensamiento (nº 3), y tenemos el firme propósito de acrecentar esta actividad en el próximo futuro, dentro de la medida de nuestras posibilidades.

I N D I C E

VOLUMEN 1

	Página
1. ENSAYOS DE REFERENCIA EN TIERRA CON EL MODELO DE INGENIERIA DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS .....	1
1.1. INTRODUCCION .....	2
1.2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION .....	3
1.3. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS .....	11
1.4. DIFICULTADES ENCONTRADAS DURANTE LA EXPERIMENTACION .....	21
1.5. VERIFICACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS PELICULAS UTILIZADAS .....	32
1.6. COMPARACION ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES .....	37
1.7. CONCLUSIONES .....	55
Referencias .....	58
2. DISEÑO Y FABRICACION DE UN EQUIPO PARA LA EXPERIMENTACION EN TIERRA CON ZONAS FLOTANTES EN CONDICIONES DE MICROGRAVEDAD SIMULADA: PLATEAU TANK FACILITY (PTF) .....	59
2.1. NOTAS PREVIAS .....	60
2.2. INTRODUCCION .....	61
2.3. ESTRUCTURA-SOPORTE .....	63
2.4. EL TANQUE .....	63
2.5. EQUIPO MOTOR .....	65
2.6. MOVIMIENTOS DEL DISCO SUPERIOR, D1 .....	66
2.6.1. Desplazamiento axial .....	66
2.6.2. Rotación .....	67
2.7. MOVIMIENTOS DEL DISCO INFERIOR, D2 .....	68
2.7.1. Rotación .....	69
2.7.2. Vibración .....	70
2.7.3. Desplazamiento lateral .....	71
2.8. MODO DE OPERACION CON EL PTF .....	72

	Página
2.8.1. Llenado y vaciado del tanque .....	72
2.8.2. Inyección y formación de la zona líquida.	72
2.8.3. Limpieza del tanque y de los discos .....	73
2.8.4. Iluminación y registro de imágenes .....	74
2.8.5. Control de movimientos .....	75
2.9. LIMITACIONES PREVISTAS DEL EQUIPO .....	76
TABLAS .....	78
FIGURAS .....	89
Referencias .....	117
PLANOS .....	118

VOLUMEN 2

3. HIDRODINAMICA DE LA ZONA FLOTANTE .....	1
3.1. INTRODUCCION .....	2
Organización de este Capítulo .....	5
3.2. MODELO MATEMATICO. SIMPLIFICACIONES .....	8
3.3. ECUACIONES GENERALES. PROBLEMAS FLUIDOMECA- NICOS .....	9
3.4. ECUACIONES GENERALES. PROBLEMAS FLUIDOTERMICOS.. 3.4.1. Aproximación de Boussinesq .....	11 12
3.5. CONDICIONES DE CONTORNO. PROBLEMAS FLUIDOMECA- NICOS .....	14
3.5.1. Condiciones en la interfase .....	15
3.5.2. Simulación de Plateau .....	16
3.6. CONDICIONES DE CONTORNO. PROBLEMAS FLUIDOTERMI- COS .....	17
3.7. MOVIMIENTOS IMPULSIVOS .....	18
3.7.1. Consideraciones generales .....	18
3.7.2. Problemas típicos .....	21
3.7.3. Ligera variación de la velocidad de ro- tación .....	23
3.7.3.1. Caso de un puente líquido cilín- drico circular .....	29
3.7.3.1.1. Cálculo de la veloci- dad .....	33

	Página
3.7.3.1.2. Cálculo de $l_1$ .....	36
3.7.3.1.3. Zona $D_{23}$ .....	38
3.7.4. Ligera variación de la velocidad de rotación. Simulación de Plateau .....	39
3.7.4.1. Zonas $D_{10}$ , $D_{20}$ , $D_{40}$ y $D_{240}$ .....	39
3.7.4.2. Zonas $D_3$ y $D_{30}$ .....	41
3.7.4.2.1. Cálculo de $l_1$ .....	49
3.7.4.3. Zona $D_{230}$ .....	51
3.7.5. Puesta en rotación. El problema del rincón .....	53
3.7.5.1. Solución en el núcleo central ..	55
3.7.5.2. Solución en el rincón .....	59
3.7.5.3. Las condiciones de contorno en la superficie libre .....	62
3.7.5.4. Ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno adicionales .....	63
3.7.5.5. Resumen de ecuaciones y condiciones de contorno para la zona del rincón en las dos primeras aproximaciones .....	64
3.8. CONCLUSIONES .....	66
APENDICE I .....	68
APENDICE II .....	71
1. INTRODUCCION .....	72
2. SOLUCION EN EL NUCLEO CENTRAL. TIEMPOS DE ORDEN UNIDAD .....	74
2.1. ZONA $D_2$ .....	75
2.2. ZONA $D_1$ .....	78
3. SOLUCION PARA TIEMPOS GRANDES .....	80
3.1. ZONAS $D_1$ y $D_2$ .....	80
3.2. ZONAS $D_4$ y $D_{24}$ .....	85
3.3. ZONAS $D_3$ y $D_{22}$ .....	90
Referencias .....	95

VOLUMEN 3

	Página
4. PRESENTACION EN PANTALLA DE LA HIDROSTATICA DE LA ZONA FLOTANTE .....	1
4.1. INTRODUCCION .....	2
4.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
4.3. ECUACIONES GENERALES .....	4
4.4. CASOS PARTICULARES .....	8
4.5. DISEÑO DEL PROGRAMA "FZ-ESS" .....	9
4.6. FUNCIONAMIENTO .....	12
4.7. MANTENIMIENTO .....	18
4.8. DOCUMENTACION .....	21
APENDICE .....	25
Referencias .....	88
5. DISIPACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO DEL CHORRO DE LLENADO .....	89
5.1. INTRODUCCION .....	90
5.2. CHORRO AXIAL .....	91
5.3. PUNTO DE REMANSO .....	94
5.4. CHORRO PARIETAL .....	97
5.5. REGION DEL BORDE .....	100
Referencias .....	103

1. ENSAYOS DE REFERENCIA EN TIERRA CON EL MODELO DE  
INGENIERIA DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS

# 1. ENSAYOS DE REFERENCIA EN TIERRA CON EL MODELO DE INGENIERIA DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS

## 1.1. INTRODUCCION

Dentro del programa general de investigaciones en el área de Física de Fluidos de la Primera Misión Spacelab se han celebrado diversas reuniones (ESA/SPICE, Colonia, Diciembre de 1979; FIAT Centro Ricerche, Turín, Marzo de 1980) entre los investigadores de dicha área, personal de la Agencia Europea del Espacio (ESA) y los constructores del Módulo de Física de Fluidos (FPM) para coordinar un plan de ensayos en tierra utilizando un modelo real del FPM, para que cada grupo investigador realice su propio experimento en un equipo análogo al que con posterioridad se utilizará en el espacio y así contrastar las secuencias experimentales propuestas con las posibilidades reales del equipo para, de esta forma y si fuera necesario, redefinir las secuencias de experimentación a la vista de las limitaciones impuestas por el prototipo ya aceptado por la ESA.

De acuerdo con este plan, a finales del pasado mes de Mayo se desplazaron a ESTEC (European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, Holanda) dos personas del equipo del Lamf para, durante tres días, tiempo asignado a cada grupo investigador, realizar diversos ensayos relacionados con el experimento 1-ES-331 utilizando el modelo de ingeniería del FPM suministrado por FIAT; este período se amplió posteriormente permaneciendo uno de los miembros del Lamf durante una semana más en ESTEC para asistir a la realización de los experimentos 1-ES-327 (J.M. Haynes) y 1-ES-328 (L.G. Napolitano) lo que permitió completar el panorama de las prestaciones y limitaciones

que, en relación con nuestro experimento, ofrece el FPM en su versión actual para la primera misión.

Obviamente, para realizar los experimentos en tierra se utilizó un procedimiento sustitutivo para simular microgravedad: baños isométricos de Plateau. Como ya se sabe, esta sustitución impone severas restricciones a las condiciones de simulación [1], tanto por la existencia de un líquido exterior al líquido de trabajo como por las limitaciones geométricas que se detallan en apartados siguientes. Aun así, la experimentación con el FPM ha permitido, además de una mayor familiarización con el aparato, comprobar, al menos parcialmente, la magnitud de los problemas que el módulo presenta en relación con nuestro experimento y poder así adecuar la descripción secuencial del mismo a las condiciones reales del FPM para evitar que estos problemas puedan frustrar el desarrollo del experimento a bordo del Space-lab, así como sugerir las posibles modificaciones a introducir en la versión actual del FPM cara a misiones posteriores.

## 1.2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION

Los ensayos de simulación se desarrollaron en el Laboratorio de Sensores Opticos de ESTEC donde fueron instalados el Modelo de Ingeniería del FPM y el correspondiente Equipo de Soporte en Tierra (GSE). En la Fig. 1 se esquematiza la instalación utilizada mostrando el FPM en la disposición de trabajo adoptada en ESTEC (con la plataforma-soporte en posición vertical) impuesta por el uso de baños de Plateau para la formación de las zonas.

En la Fig. 2 se muestra un esquema de la configuración

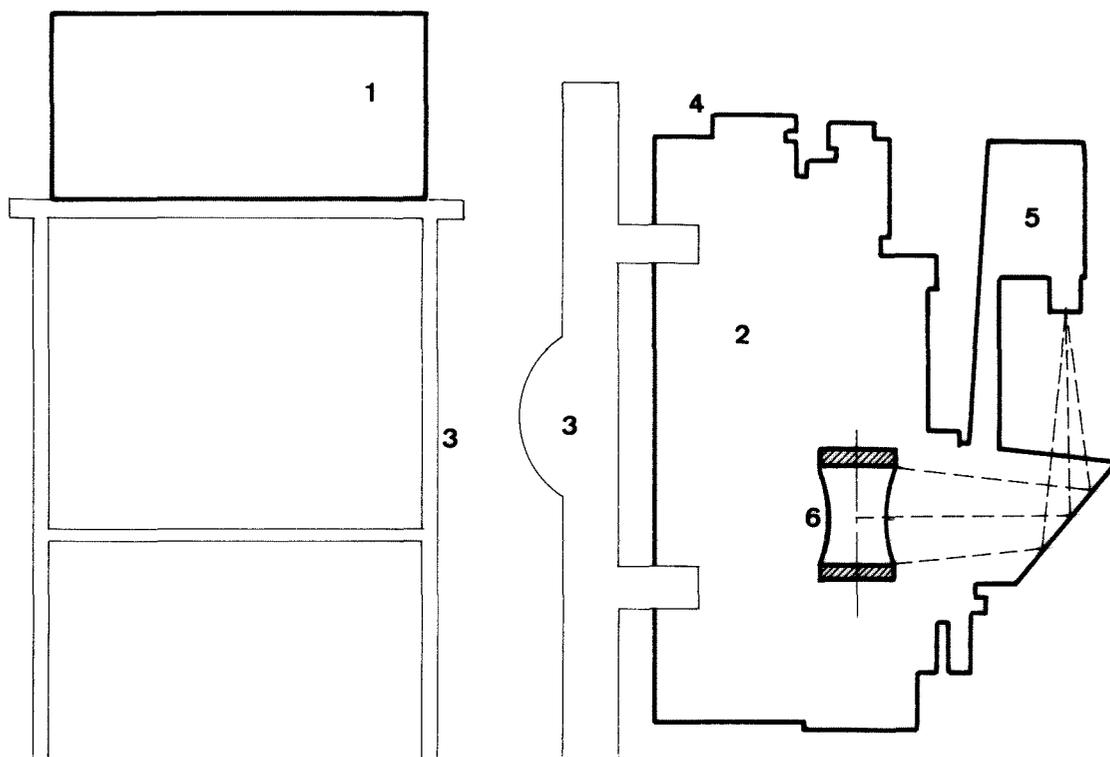


Fig. 1. Disposición del equipo durante los ensayos en ESTEC.  
1. Ground Support Equipment (GSE); 2. Fluid Physics Module (FPM); 3. Soportes; 4. Panel de mandos del FPM; 5. Cámara fotográfica; 6. Zona flotante.

de trabajo. Dada la negativa del fabricante del FPM a que cualquier parte de la cámara de ensayos FPM estuviera en contacto con los líquidos utilizados durante la simulación, fue necesario diseñar y construir apéndices especiales para cada experimento que aseguraran esta condición; estos apéndices (suministrados por ESTEC en su mayor parte) corresponden a las partes de trazo fino en dicha figura. La cámara de ensayos del FPM estaba desprovista de la pared de cristal próxima al espejo para facilitar la manipulación en el interior de la misma. El recipiente para el baño estaba fijo al disco inferior (disco 2) y por tanto sometido a los movimientos del mismo (rotación, vibración y desalineación); se utilizaron dos recipientes: uno cilíndrico de 140 mm

de diámetro exterior y 126 mm de altura (dimensiones máximas permitibles, ya que los recipientes tenían que ser introducidos en la cámara a través de la abertura correspondiente al cilindro-soporte del disco 1 y 126 mm es la máxima distancia a la que se puede retirar el mencionado disco) para aquellas secuencias en las que la zona debía estar sometida a rotación, y otro recipiente paralelepípedo, de menores dimensiones, para los ensayos cuyo fin era visualizar la forma de la zona; ambos recipientes disponían en la base de un soporte para el amarre de los discos de trabajo auxiliares. De igual forma, se montó sobre el disco 1 un soporte de sujeción para los discos auxiliares superiores, dicho soporte poseía una perforación a lo largo del eje a través de la cual era conducido el líquido de trabajo desde el orificio de salida del disco 1 hasta el orificio, de 2 mm de diámetro, del disco auxiliar superior donde se realizaba la inyección.

Se dispuso de tres juegos de discos auxiliares. El primero, formado por un disco plano y otro cónico (de semiángulo  $80^\circ$ ) ambos de 80 mm de diámetro, se utilizó para la formación de zonas poco esbeltas y la rotura de las mismas por extracción de líquido. El segundo constaba de discos planos de 15 mm de diámetro, máximo tamaño posible para la obtención de roturas de zonas continuamente cilíndricas, ya que para roturas de este tipo es preciso que las zonas tengan esbelteces próximas al valor  $\pi$  y la longitud máxima alcanzable, debido al tamaño del soporte del disco auxiliar inferior, era de unos 40 mm.

El tercer juego, formado por un par de discos planos de 80 mm de diámetro sólo pudo utilizarse en los últimos ensayos ya que fueron fabricados durante nuestra estancia, por lo que no

estuvieron disponibles desde el principio como hubiera sido de desear.

Por estas razones (diferentes recipientes y diferentes discos según la parte del experimento a simular) no fue posible realizar secuencias completas manteniendo los valores de la longitud y volumen de la zona que se han propuesto para la experimentación en el espacio. Además, no fue posible obtener imágenes con la cámara axial (a través del disco 2) ya que en el campo de visión de esta cámara aparecían, antes de la zona, el fondo del recipiente, el soporte del disco auxiliar inferior y el mismo disco, elementos que, pese a estar fabricados con un material transparente, hubieran dado una imagen tan deformada que se juzgó oportuno no realizar tomas con esta cámara.

Como es sabido, el uso de la técnica de Plateau requiere que el líquido de trabajo y el baño tengan la misma densidad, para que esté equilibrada la presión hidrostática en la interfase líquido-baño. Como líquido de trabajo se utilizó una mezcla de di-n-butilftalato (DBF) y di-iso-octilftalato (DOF) en relación 1:3 en volumen aproximadamente (27.40% de DBF en volumen a 25 °C) que tiene la misma densidad que el agua destilada utilizada como líquido de baño. Con el fin de visualizar el movimiento interno se mezclaron con el líquido trazadores sólidos (esferas cerámicas de diámetros comprendidos entre 0.074 y 0.053 mm) en una concentración de  $50 \text{ g/m}^3$ , estimada como óptima en estudios realizados con anterioridad en el Lamf, [2].

Para obtener las mejores características de mojado de los discos de trabajo, éstos se fabricaron de un material orgánico, Perspex, mojado preferentemente por la mezcla DBF-DOF, y

para evitar que el líquido sobrepasara los bordes de los discos la superficie lateral de los mismos se trató con ácido sulfúrico, para que fuera mojada preferentemente por el agua.

En cuanto al FPM, este módulo ya ha sido descrito con suficiente meticulosidad en otras publicaciones, [3], [4], por lo que sólo nos referiremos aquí a aquellas partes que sean necesarias para la explicación de los tests realizados en ESTEC, en particular el sistema de inyección y los paneles de mando del FPM y el GSE.

El sistema de inyección, cuya sección puede apreciarse esquematizada en la Fig. 2, consta de una carcasa cilíndrica, dos pistones y un eje central hueco sobre el que puede deslizarse uno de los pistones. El otro pistón va unido al disco 1 mediante el conducto de inyección, mientras que el pistón deslizante va unido a la carcasa del depósito mediante un sistema de rosca sin fin que permite desplazarlo manualmente respecto a la carcasa y así poder realizar la inyección, a voluntad del operador, de pequeños volúmenes de líquido. El conducto cilíndrico central, al que va fijado el pistón solidario al disco 1, aloja la válvula de apertura del depósito, que se acciona manualmente desplazando axialmente un vástago interior; una vez abierta la válvula, el líquido pasa a través de ésta y del conducto de inyección hacia el orificio de salida situado en el disco 1.

El control y mando de las operaciones realizadas en los ensayos se efectuó por medio de los paneles de control del FPM y del GSE, que se muestran en las Figs. 3 y 4 respectivamente. El panel del FPM está dividido en siete secciones correspondientes al control de los sistemas siguientes:

- 1) Limpieza de la cámara de ensayos.
- 2) Inyección y desplazamiento del disco de inyección.
- 3) Rotación de ambos discos.
- 4) Filmación.
- 5) Calentamiento del disco 1.
- 6) Diferencia de potencial.
- 7) Vibración del disco 2.

Además de los anteriores el FPM dispone de otros tres mandos, situados en las proximidades del panel, para el posicionamiento manual del filtro óptico (que controla el tipo de iluminación), el control de la desalineación del disco 2 y la determinación de la amplitud de la vibración del disco 2.

El panel del GSE, que sirve de simulador de la Consola de Mando del Materials Science Double Rack en el que irá instalado el FPM, presenta cinco contadores: los dos pequeños de la izquierda (Fig. 4) indican la posición en la que se encuentran el depósito y el disco de inyección, respecto al disco 2, los dos centrales no fueron utilizados durante nuestros ensayos dado que sirven para mostrar los valores de parámetros no aplicables en nuestro experimento (temperaturas captadas por los termistores del disco 2 y diferencia de potencial entre discos) y, por último, en el situado a la derecha se muestra alguna de las dos señales de posicionamiento manual (desalineación o amplitud de la vibración del disco 2) seleccionadas con el conmutador anexo correspondiente.

### 1.3. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

Los experimentos realizados en ESTEC pueden resumirse en tres grupos:

- a) ensayos de prueba y familiarización con el equipo,
- b) ensayos de comprobación de la secuencia propuesta para el experimento 1-ES-331, y
- c) ensayos realizados con otros experimentadores.

Los primeros, secuencias parciales del experimento 1-ES-331, permitieron obtener una cierta pericia en el manejo del FPM y sirvieron para verificar el funcionamiento de los diversos subsistemas del módulo relacionados con este experimento. Dentro de este grupo se incluyen también los ensayos realizados después de haber terminado el tiempo disponible para la experimentación, cuando se tuvo conocimiento de que las imágenes tomadas durante las primeras operaciones de familiarización (con la película S0-115) no tenían una calidad aceptable y se realizaron nuevas pruebas con este mismo tipo de película y con uno nuevo: "VIDEO NEWS-COLOUR" de alta sensibilidad, 400 ASA, con el fin de estimar los valores de los parámetros de filmación más adecuados, tales como apertura del diafragma y ángulo de apertura del obturador.

Dentro del segundo grupo se simuló una secuencia completa del experimento con el fin de comprobar su puesta a punto así como descubrir posibles dificultades e incompatibilidades que pudiesen aparecer en el transcurso de la misma.

Como ya se dijo anteriormente, terminado el tiempo del que se disponía, uno de los miembros del Lamf permaneció en ESTEC durante una semana más para asistir al desarrollo de los experi-

mentos 1-ES-327 y 1-ES-328 por su interés en relación con el nuestro, particularmente el primero, referente a la dinámica de mojado de la superficie de un disco por líquido en forma de casquete esférico situado en el otro disco, lo que implicaba la realización de inyección de líquido dentro de dicho casquete así como la extracción de líquido en el proceso de vaciado de la zona flotante obtenida después del mojado, fenómenos del máximo interés, tanto para la formación de la zona como para el proceso final de vaciado y limpieza.

En la Tabla 1 se resumen los ensayos realizados dependientes del Lamf, y aunque en lo que sigue se describen tan solo las operaciones relacionadas con estas secuencias, en valoraciones posteriores se incluyen los problemas y limitaciones observados en todos los ensayos correspondientes a nuestra estancia en ESTEC.

En cualquier ensayo se pueden considerar tres fases claramente diferenciadas: preparación, operación y limpieza. La primera comprende todas aquellas tareas de puesta a punto del FPM previas a la formación de la zona. En la Tabla 2 se resumen estas actividades de preparación comentándose a continuación únicamente algunas particularidades:

i) El llenado del depósito se realizó una vez montado en el FPM, por succión del líquido desde otro recipiente. Una vez lleno se procedió a desmontarlo del FPM y eliminar el aire residual que pudiera contener. Después se volvió a montar en el FPM.

ii) El soporte del disco auxiliar superior sólo se podía unir al disco 1 estando éste desmontado; en consecuencia,

Tabla 1

Ensayos del Lamf realizados en ESTEC

DENOMINACION	CONFIGURACION	FILMACION <sup>a</sup>	ACTIVIDADES REALIZADAS <sup>b</sup>	DESCRIPCION Y COMENTARIOS
Ensayos de prueba y familiarización con el equipo.	Recipiente: Cilíndrico Discos auxiliares: Plano y cónico, ambos de 80 mm de diámetro.	Technical Pan Film SO-115	Llenado Isorrotación Parada Rotación Parada Vibración Desalineación Rotura Recogida	Familiarización con los mandos del FPM, en particular con los movimientos relativos entre disco 1 y pistón del depósito de líquido. Movimientos en zonas de pequeña esbeltez, rotura por extracción de líquido. Falta de calidad en las pruebas fotográficas debido a un revelado deficiente.
	Recipiente: Cilíndrico Discos auxiliares: Planos, de 15 mm de diámetro.		Llenado Rotura Llenado Rotura Recogida Llenado Rotura por rotación	Roturas axilsimétricas y en comba de zonas cilíndricas de muy pequeño volumen. Falta de calidad en las fotografías obtenidas debido a un revelado deficiente.
	Recipiente: Paralelepípedo Discos auxiliares: Planos, de 80 mm de diámetro.	Technical Pan Film SO-115 y "Video News-Colour"	Llenado Rotura	Fotografía de una zona estática variando los parámetros de filmación para determinar los valores óptimos de los mismos.
Simulación y comprobación de la secuencia del experimento 1-ES-331	Recipiente: Cilíndrico Discos auxiliares: Plano y cónico, ambos de 80 mm de diámetro.	Linagraph Shellburst Film 2476	Llenado Vibración Rotación Contrarrotación Isorrotación Desalineación Parada Rotura Recogida	Simulación paso a paso de la secuencia. Debido a las limitaciones geométricas la máxima esbeltez alcanzada fue L/D=0.43, la rotura se realizó extrayendo líquido de la zona. Las fotografías obtenidas son de buena calidad aunque en las mismas la concentración de trazadores es baja (problemas de flotabilidad).

<sup>a</sup> Los parámetros de filmación utilizados con las películas SO-115 y 2476 fueron los recomendados por FIAT, [5], y se resumen a continuación junto con las características más relevantes de las películas empleadas.

PELICULA	Kodak Technical Pan Film SO-115 (Negativo)	Linagraph Shellburst Film 2476 (Negativo)	Video News-Colour (Reversible)
SENSIBILIDAD ASA	50	250	400
RESOLUCION [Líneas/mm]	320	160	
ILUMINACION	De fondo, con filtro verde de "Green Wratten 74"	En un plano meridiano, sin filtro.	
APERTURA DE DIAFRAGMA	11	4	
ANGULO DE OBTURADOR	30°	110°	
MODO DE FILMACION (Posición del mando en el FPM)	BRIEF EXPOSURE	TIME EXPOSURE	
INDICACIONES	Para fotografiar la forma externa de la zona.	Para fotografiar el movimiento interno.	Para fotografiar la forma externa de la zona.

<sup>b</sup> Existen otras actividades no consignadas en esta Tabla necesarias en cualquier ensayo, tales son las de preparación, previas al ensayo, y las de desmontaje y limpieza, finalizado éste.

Tabla 2  
 Actividades durante las fases de preparación,  
 desmontaje y limpieza

Fase	Actividad
Preparación	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Montaje del disco auxiliar inferior en el recipiente.</li> <li>* Colocación del recipiente sobre el disco 2.</li> <li>* Llenado del recipiente con agua destilada.</li> <li>* Obtención del líquido de trabajo.</li> <li>* Mezclado del líquido de trabajo con trazadores.</li> <li>* Colocación del depósito de líquido en el FPM.</li> <li>* Llenado del depósito en la mezcla líquido-trazadores.</li> <li>* Desmontaje del depósito del FPM.</li> <li>* Eliminación del aire residual en el depósito.</li> <li>* Colocación del depósito.</li> <li>* Montaje del disco 1 con el soporte para disco auxiliar.</li> <li>* Colocación del disco auxiliar superior.</li> <li>* Montaje del cassette de película en el portacassette de la cámara.</li> <li>* Montaje del portacassette en la cámara B.</li> <li>* Ajuste de la cámara B (diafragma, obturador).</li> <li>* Puesta en contacto de los discos auxiliares.</li> <li>* Puesta a cero de los contadores de posición.</li> <li>* Formación de una zona cilíndrica inicial.<sup>a</sup></li> </ul>
Desmontaje y Limpieza	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Desmontaje del disco auxiliar superior.</li> <li>* Desmontaje del disco 1 con el soporte del disco auxiliar.</li> <li>* Vaciado del recipiente.</li> <li>* Desmontaje del recipiente.</li> <li>* Limpieza del recipiente y otros (paredes del FPM, discos auxiliares, soportes, etc.).</li> <li>* Desmontaje del depósito del FPM.</li> <li>* Vaciado del depósito.</li> <li>* Desmontaje del depósito en sus diversas piezas.</li> <li>* Limpieza de las piezas del depósito.</li> <li>* Montaje del depósito.</li> </ul>

<sup>a</sup> En los ensayos en los que se utilizó el disco auxiliar inferior cónico.

para introducir el recipiente cilíndrico en el interior de la cámara de ensayos se debía desmontar previamente el conjunto disco 1 - soporte pues si no, debido al espacio ocupado por el soporte, el vano disponible no permitía la entrada del recipiente.

iii) La colocación del ángulo adecuado de apertura del obturador requería el desmontaje del objetivo de la cámara y su manipulación para seleccionar el valor elegido.

iv) La puesta en contacto de los discos de trabajo se hubo de hacer manualmente debido a la existencia de apéndices añadidos a los discos originales. Sin embargo, cuando se utilizan los discos originales la puesta en contacto es automática por accionamiento de unos conmutadores ajustables que detienen el movimiento en el momento de juntarse los discos y realizan la puesta a cero de los contadores de posición.

v) Como uno de los discos auxiliares era cónico, en los ensayos con este disco fue necesario inyectar una cierta cantidad de líquido (manualmente) para formar una pequeña zona cilíndrica que sirviera como configuración inicial para la fase de operación. La inyección se acompañó de un lento giro del disco con el fin de facilitar el mojado de los discos.

La segunda fase, operación, comprende aquellas tareas que implican un manejo directo de la zona y corresponden al desarrollo de los ensayos propiamente dichos.

La tercera, incluye las tareas de desmontaje y limpieza de las partes manchadas por el líquido de trabajo (Tabla 2) y tienen lugar, al menos parte de ellas, no sólo al final de la experimentación, sino que pueden ser necesarias en algún momento durante la fase de operación, cuando haya ocurrido alguna fuga

molesta de líquido de trabajo.

Aunque durante las fases primera y tercera no se recoge ninguna información útil para el experimentador, son las que consumen mayor cantidad de tiempo.

En la fase segunda, de operación, cualquier actividad en el módulo requiere dos acciones al menos; una de preselección colocando en los diales del panel de control los valores deseados (desplazamientos, velocidades, etc., que se quieran alcanzar) y otra de mando accionando los interruptores de comienzo de la operación. Hay que subrayar que como cada operación automática tiene un conmutador de comienzo/parada, cuando se quiere filmar una operación es necesario accionar al menos dos conmutadores (el/los de operación y el de filmación), lo que puede resultar incómodo para los astronautas en la experimentación en el espacio.

El final de una operación se obtiene automáticamente en los casos de desplazamiento axial o filmación (cuando se alcanzan los valores finales de desplazamiento o número de imágenes seleccionados en los diales correspondientes) o bien manualmente en todos los casos que se quiera accionando la posición STOP del conmutador. Como norma, después de cada secuencia de filmación se toman varias imágenes con el obturador cerrado a modo de distanciador entre las diversas secuencias para facilitar su identificación.

En las Tablas 3 y 4 se describe el experimento 1-ES-331 tal como está propuesto en la actualidad, y en la Tabla 5 se resumen, con el mismo formato, las actividades realizadas durante la fase de operación en el ensayo de simulación de la secuencia

propuesta para el experimento.

La cabecera de las Tablas se ha diseñado de acuerdo con la disposición que presentan los controles en el panel del FPM, con el fin de simplificar la relación entre la definición de la secuencia y su realización. En la primera fila se designan las operaciones y cada columna representa actividades que se han de realizar antes de pasar a las indicadas en la columna siguiente, como son, por ejemplo, el ajuste de los diales de posición, velocidades, cámaras, etc., o el accionamiento de los conmutadores de comienzo de operación (seleccionada en los diales) y de filmación.

Referente a los procesos indicados en la Tabla 5, correspondientes al ensayo de comprobación de la secuencia propuesta para el experimento 1-ES-331, es preciso puntualizar que:

i) El llenado se realizó siguiendo formas cilíndricas, es decir separando los discos e inyectando líquido simultáneamente a la velocidad adecuada.

ii) La vibración tuvo lugar a partir de la zona obtenida, y una vez parada la filmación (automáticamente) se realizó manualmente la parada de la vibración.

iii) La desalineación se hizo estando la zona en isorrotación, en primer lugar se separaron los ejes de los discos 2 mm y posteriormente se volvieron a alinear filmándose tan sólo esta segunda operación.

iv) Para la rotura, se ajustaron inicialmente unos valores del número de imágenes a tomar y de la posición final del depósito, pero la parada fue manual cuando se observó que la rotura había ocurrido un poco antes de que se alcanzaran los valo-

Tabla 3

Secuencia propuesta para el primer ensayo del experimento 1-ES-331.

Líquido: Dimetil Silicona (5 cs) con trazadores.<sup>a</sup>

OPERACIONES MANDOS		LLENADO	VIBRACION	ROTACION	CONTRA-ROTACION	ISO-ROTACION	DESALI-NEACION	PARADA	ROTURA	RECOGIDA	
		<i>Filling</i>	<i>Vibration</i>	<i>Rotation</i>	<i>Counter-Rotation</i>	<i>Iso-Rotation</i>	<i>Disa-lignment</i>	<i>Stopping</i>	<i>Breaking</i>	<i>Removal</i>	
AXIAL MOVEMENT	F.P. <sup>b</sup>	POSITION [mm]	100.0						130.0	000.0	
		SPEED [mm/s]	.500						.250	.500	
	RES. <sup>c</sup>	POSITION [mm]	084.0						119.2	000.0	
		SPEED [mm/s]	.420						.290	.420	
	RESET										
	START		M							M	M
STOP		A							A	A	
ROTATIONAL MOVEMENT	F.P. <sup>d</sup>	SPEED [rpm]			+10.0			00.0			
		RAMP [s/rpm]			1		0				
		START				M					
		STOP									
	O.P. <sup>d</sup>	SPEED [rpm]				-10.0	+10.0	00.0			
		RAMP [s/rpm]				1	1	0			
		START				M	M				
		STOP									
	SYNC.							M			
	SHOOTING	CAMERA	B	*	*	*	*	*	*	*	*
A&B											
MODE		CINE									
		BRIEF EXP.									
		TIME EXP.	*	*	*	*	*	*	*	*	
TIME EXP. [s]		0.25							*	*	
		0.50	*	*	*	*	*	*			
INTERVAL [s]		01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	00.5	00.5	
FRAME NUMBER	250	50	150	150	150	050	100	250	550		
START		M	M	M	M	M	M	M	M		
STOP		A	A	A	A	A	A	A	A		
VIBRATION	AMPLITUDE <sup>e</sup> [mm]		0	0.5							
	OSC. FREQ. [Hz]			0.50							
	RAMP	SLOW									
		FAST		*							
	START			M							
STOP				M							
DISALIGNMENT <sup>e</sup> [mm]		0					1 0				

<sup>a</sup> Los números en la Tabla reproducen la posición de los diales del panel de mandos del FPM. Los otros símbolos se han empleado de acuerdo con la siguiente clave: M - Accionamiento manual. A - Parada automática. \* - Posición del selector de: Cámara (B ó A&B), Modo de filmación (cine, Brief Exp. o Time Exp.), Tiempo de exposición (0.25 ó 0.50 s), Aceleración de la vibración (SLOW, 0.1 Hz/s, o FAST, 10 Hz/s).

<sup>b</sup> Disco 1 (Feeding End Plate).

<sup>c</sup> Depósito de líquido (Reservoir).

<sup>d</sup> Disco 2 (Opposite End Plate).

<sup>e</sup> Este mando está fuera del panel y es completamente manual.

Tabla 4

Secuencia propuesta para el segundo ensayo del experimento 1-ES-331.

Líquido: Dimetil Silicona (1000 cs) con trazadores.<sup>a</sup>

OPERACIONES MANDOS		LLENADO	VIBRACION	ROTACION	CONTRA-ROTACION	ISO-ROTACION	DESALI-NEACION	PARADA	ROTURA	RECOGIDA <sup>f</sup>	
		Filling	Vibration	Rotation	Counter-Rotation	Iso-Rotation	Disa-lignment	Stopping	Breaking	Removal	
AXIAL MOVEMENT	F.P. <sup>b</sup>	POSITION [mm]	125.0						125.0	055.0	
		SPEED [mm/s]	.500						.000	.500	
	RES. <sup>c</sup>	POSITION [mm]	080.0						105.0	035.0	
		SPEED [mm/s]	.320						.250	.500	
	RESET										
	START									M	M
STOP			A						A	A	
ROTATIONAL MOVEMENT	F.P. <sup>b</sup>	SPEED [rpm]			+10.0			00.0			
		RAMP [s/rpm]			1		0				
		START				M					
		STOP									
	O.P. <sup>d</sup>	SPEED [rpm]				-10.0	+10.0		00.0		
		RAMP [s/rpm]				1	1		0		
		START				M	M				
		STOP									
	SYNC.							M			
	SHOOTING	CAMERA	B								
A&B			*	*	*	*	*	*	*	*	
MODE		CINE									
		BRIEF EXP.									
		TIME EXP.	*	*	*	*	*	*	*	*	
TIME EXP.		0.25								*	
		[s] 0.50	*	*	*	*	*	*	*	*	
INTERVAL [s]		01.5	01.5	01.5	01.5	01.5	01.5	01.5	00.5	00.5	
FRAME NUMBER	170	170	170	170	170	170	040	080	200	300	
START			M	M	M	M	M	M	M	M	
STOP			A	A	A	A	A	A	A	A	
VIBRATION	AMPLITUDE <sup>e</sup> [mm]		0	0.5							
	OSC. FREQ. [Hz]			1.00							
	RAMP	SLOW									
		FAST		*							
	START				M						
STOP					M						
DISALIGNMENT <sup>e</sup> [mm]		0					1 0				

<sup>a</sup> Los números en la Tabla reproducen la posición de los dials del panel de mandos del FPM. Los otros símbolos se han empleado de acuerdo con la siguiente clave: M - Accionamiento manual. A - Parada automática. \* - Posición del selector de: Cámara (B ó A&B), Modo de filmación (cine, Brief Exp. o Time Exp.), Tiempo de exposición (0.25 ó 0.50 s), Aceleración de la vibración (SLOW, 0.1 Hz/s, o FAST, 10 Hz/s).

<sup>b</sup> Disco 1 (Feeding End Plate).

<sup>c</sup> Depósito de líquido (Reservoir).

<sup>d</sup> Disco 2 (Opposite End Plate).

<sup>e</sup> Este mando está fuera del panel y es completamente manual.

<sup>f</sup> En este ensayo, la operación de recogida se realiza en dos pasos; el primero incluido en la Tabla y el segundo como se indica a continuación.

OPERACION MANDOS		RECOGIDA		
		Removal		
AXIAL MOVEMENT	POSITION [mm]	000.0		
	SPEED [mm/s]	.500		
	POSITION [mm]	000.0		
	SPEED [mm/s]	.318		
	RESET			
	START			M
STOP			A	

Tabla 5

Secuencia de simulación del experimento 1-ES-331 desarrollada en ESTEC.

Líquido: mezcla de Dibutilftalato y Diotilftalato en un baño de agua destilada.<sup>a</sup>

OPERACIONES MANDOS		LLENADO	VIBRACION	ROTACION	CONTRA-ROTACION	ISO-ROTACION	DESALI-NEACION	PARADA	ROTURA	RECOGIDA
		<i>Filling</i>	<i>Vibration</i>	<i>Rotation</i>	<i>Counter-Rotation</i>	<i>Iso-Rotation</i>	<i>Disa-Alignment</i>	<i>Stopping</i>	<i>Breaking</i>	<i>Removal</i>
AXIAL MOVEMENT	F.P. <sup>a</sup>	POSITION [mm]	040.0						040.0	000.2
		SPEED [mm/s]	.266						.000	.300
	RES. <sup>c</sup>	POSITION [mm]	015.0						040.0	000.2
		SPEED [mm/s]	.100						.250	.300
		RESET								
		START	M							M
	STOP	A							A	A
ROTATIONAL MOVEMENT	F.P. <sup>b</sup>	SPEED [rpm]		+10.0				00.0		
		RAMP [s/rpm]		1				0		
		START			M					
		STOP								
	O.P. <sup>d</sup>	SPEED [rpm]			-10.0	+10.0		00.0		
		RAMP [s/rpm]			1	1		0		
		START			M	M				
		STOP								
	SYNC.						M			
SHOOTING	CAMERA	B	*	*	*	*	*	*	*	*
		A&B								
	MODE	CINE								
		BRIEF EXP.								
		TIME EXP.	*	*	*	*	*	*	*	*
	TIME EXP. [s]	0.25								
		0.50	*	*	*	*	*	*	*	*
	INTERVAL [s]	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	01.0	
FRAME NUMBER	170	050	050	050	080	020	050	100		
START	M	M	M	M	M	M	M	M		
STOP	A	A	A	A	A	A	A	A		
VIBRATION	AMPLITUDE <sup>e</sup> [mm]	0	0.5							
	OSC. FREQ. [Hz]		1.00							
	RAMP	SLOW								
		FAST		*						
	START		M							
STOP			M							
DISALIGNMENT <sup>e</sup> [mm]	0						2	0		

<sup>a</sup> Los números en la Tabla reproducen la posición de los dials del panel de mandos del FPM. Los otros símbolos se han empleado de acuerdo con la siguiente clave: M - Accionamiento manual. A - Parada automática. \* - Posición del selector de: Cámara (B ó A&B), Modo de filmación (cine, Brief Exp. o Time Exp.), Tiempo de exposición (0.25 ó 0.50 s), Aceleración de la vibración (SLOW, 0.1 Hz/s, o FAST, 10 Hz/s).

<sup>b</sup> Disco 1 (Feeding End Plate).

<sup>c</sup> Depósito de líquido (Reservoir).

<sup>d</sup> Disco 2 (Opposite End Plate).

<sup>e</sup> Este mando está fuera del panel y es completamente manual.

res prefijados.

v) Después se justaron los discos, extrayendo líquido, para retirar la mayor parte del mismo, con el fin de minimizar la pérdida de líquido y de facilitar la limpieza.

#### 1.4. DIFICULTADES ENCONTRADAS EN LA EXPERIMENTACION

Tal vez la consecuencia de mayor importancia entre las enseñanzas obtenidas de la experimentación en ESTEC es la apreciación de las dificultades que aparecen en el curso de la misma, lo que permitirá intentar una adecuada solución a estos problemas.

Aunque algunas dificultades tienen fácil solución, la importancia de otras, como podrá apreciarse más adelante, es tal que puede poner en peligro el éxito de los experimentos, tanto el nuestro como los del resto de los experimentadores.

Con el fin de obtener un panorama amplio de las limitaciones que el FPM presenta en relación con el conjunto de experimentos propuestos para la primera misión Spacelab y de las posibles modificaciones que tanto en el FPM como en los experimentos crean oportuno sugerir los grupos investigadores, se ha elaborado en el Lamf un cuestionario que permitirá unificar, como resultado de las sesiones de ensayo, las impresiones de los experimentadores con vistas a adoptar un criterio común en cuanto a las prestaciones que debe ofrecer el FPM cara a futuras misiones. Estos cuestionarios fueron distribuidos a los demás grupos investigadores, pero aún no han sido devueltos por lo que, en lo que sigue, sólo se reseñan los problemas encontrados durante nuestro período de estancia en ESTEC. Las dificultades se han clasifica-

do, como muestra la Tabla 6, según las fases de experimentación durante las que han aparecido: montaje, operación y limpieza, y se comentan a continuación en el orden en que aparecen en dicha Tabla.

### Elección de los líquidos y compatibilidad con los materiales del FPM

Ciertamente, parte de este problema es inherente a la utilización de baños de Plateau y en consecuencia no se presentará en el espacio. La razón de incluirlo aquí es que aún queda por desarrollar, antes de la primera misión Spacelab, una amplia gama de ensayos en tierra en los que se utilizarán baños de Plateau, para los que será muy útil la experiencia adquirida. Los líquidos a emplear en la simulación de Plateau (el líquido de trabajo y el de baño) deben cumplir los siguientes requisitos:

- Tener igual densidad.
- Ser inmiscibles.
- Ser transparente y de fácil manipulación (el baño).
- Ser compatibles con los materiales del FPM.

La dificultad más importante se presenta a la hora de cumplir la primera condición que, en general, se consigue mediante la dilución de un líquido en otro de diferente densidad, de manera que la mezcla resultante tenga la misma densidad que un tercer líquido inmisible con los anteriores. En los ensayos en ESTEC se consideraron dos combinaciones diferentes de líquidos; en una de ellas el líquido de trabajo era un aceite de silicona como el propuesto para los experimentos a bordo del Spacelab, mientras que el baño era una mezcla de alcohol y agua en la pro-

Tabla 6

Principales dificultades encontradas durante la experimentación en ESTEC

Actividad y/o subsistema		Problemas
Preparación	Líquidos	* Elección de líquidos y compatibilidad con los materiales del FPM.
	Depósito	* Cambio del depósito de líquido.
	Cámaras	* Enfoque de las cámaras. * Apertura del obturador. * Cambio de película.
Operación	Panel de Control	* Mando y control de la inyección.
	Depósito	* Accionamiento de la válvula. * Inyección en zonas de pequeño volumen.
	Discos	* Visión de la zona en zonas cortas. * Mojado de los discos.
	Película	* Revelado no-estándar.
	Cámaras	* Ensamblamiento del portacassette en la cámara.
	Iluminación	* Perturbaciones en la filmación con la cámara B. * Intensidad luminosa necesaria para filmar con la cámara A.
Limpieza	Tiempo Empleado	* Carencia de disolventes adecuados.

porción adecuada para que su densidad sea la misma que la del aceite; en la otra, el líquido de trabajo era una mezcla de DOF y DBF con la misma densidad que el líquido del baño: agua destilada.

Para el uso de la técnica de Plateau se ha mostrado de más fácil manipulación la última combinación debido a su mayor estabilidad, ya que en la primera el líquido del baño se estratifica variando la concentración de alcohol con la altura, lo que origina un gradiente de densidad que estropea la simulación, aparte de los problemas de seguridad que conlleva trabajar con líquidos inflamables; la mezcla DOF-DBF presentó, sin embargo, problemas de incompatibilidad con las juntas del depósito, pues las juntas se degradaron al entrar en contacto con la mezcla y aumentaron de tamaño, dificultando enormemente las operaciones de montaje y desmontaje del depósito.

#### Cambio del depósito

Además del problema anterior que implicaba la realización de un enorme esfuerzo físico para desenroscar el depósito de su alojamiento en el FPM, para el desmontaje del depósito es necesario utilizar ambas manos, lo que es de difícil realización en el espacio.

#### Enfoque de las cámaras

Las cámaras utilizadas (VINTEN MK 3) carecen de visor de enfoque incorporado por lo que, para la misión Spacelab, serán enfocadas en tierra siendo imposible que en vuelo el especialista pueda verificar visualmente el enfoque y/o modificarlo ca-

so de ocurrir alguna anomalía que lo variara.

#### Apertura del obturador

La utilización de diferentes tipos de película en el caso de la cámara B requiere, en general, el cambio de la apertura del diafragma y del ángulo de apertura del obturador. El primero no presenta ningún problema pero el segundo requiere desmontar el objetivo de la cámara y regular el obturador que está situado dentro de la cámara, lo que será imposible cuando el FPM esté montado en el Spacelab debido a la posición de dicha cámara.

#### Cambio de película

Cuando se necesite cambiar de película o se haya consumido la montada en la máquina será necesario vaciar el portacassette y volver a introducir un cassette nuevo, operación que se ha mostrado muy complicada de realizar con una sola mano.

#### Mando y control de la inyección

El diseño del panel de control hace complicadas las operaciones de inyección ya que al estar acoplados el movimiento del depósito y el del disco es necesario realizar ciertos cálculos, sencillos pero molestos, para determinar la relación entre las velocidades de ambos, así como sus posiciones finales.

Es posible que una adecuada modificación del panel de control en lo relativo a los movimientos axiales (del depósito y del disco de inyección) solucionase el problema, tal vez unificando los mandos de manera que su manejo fuera más intuitivo. Un sistema alternativo al actual podría ser uno que utilizase una

palanca proporcional con posibilidad de deflexión en cualquier dirección, tal como se muestra en la Fig. 5; en la región central de las deflexiones (palanca vertical) estaría desconectado el sistema; en la región intermedia los movimientos se realizarían a velocidades pequeñas, siendo movimientos sencillos (sólo del disco o del depósito) en las posiciones N, S, E y O y combinados en las posiciones intermedias, y en la región externa el control sería proporcional, con la velocidad función de la deflexión de la palanca. La fuerza del muelle de la palanca debería ser como se representa en la Fig. 5 con el fin de hacer sensible al operador la transición entre las diversas regiones.

Si este sistema pudiese adaptarse al panel de control actual, éste podría servir para mostrar, con la precisión que actualmente se dispone, los valores de los diversos parámetros, mientras que los operadores tendrían un control más intuitivo de los instrumentos.

#### Accionamiento de la válvula

La apertura o cierre de la válvula de inyección puede dar lugar a la eyección de una pequeña cantidad de líquido si no se realiza con cierto cuidado.

#### Inyección en zonas de pequeño volumen

En el curso de la experimentación con zonas de pequeño volumen (con discos de 15 mm de diámetro) aparecieron fenómenos de inyección no uniforme, cuyas causas no están establecidas aún, pudiendo tener su origen en fenómenos transitorios al comienzo de la inyección, debidos a deformaciones del depósito o a la pre

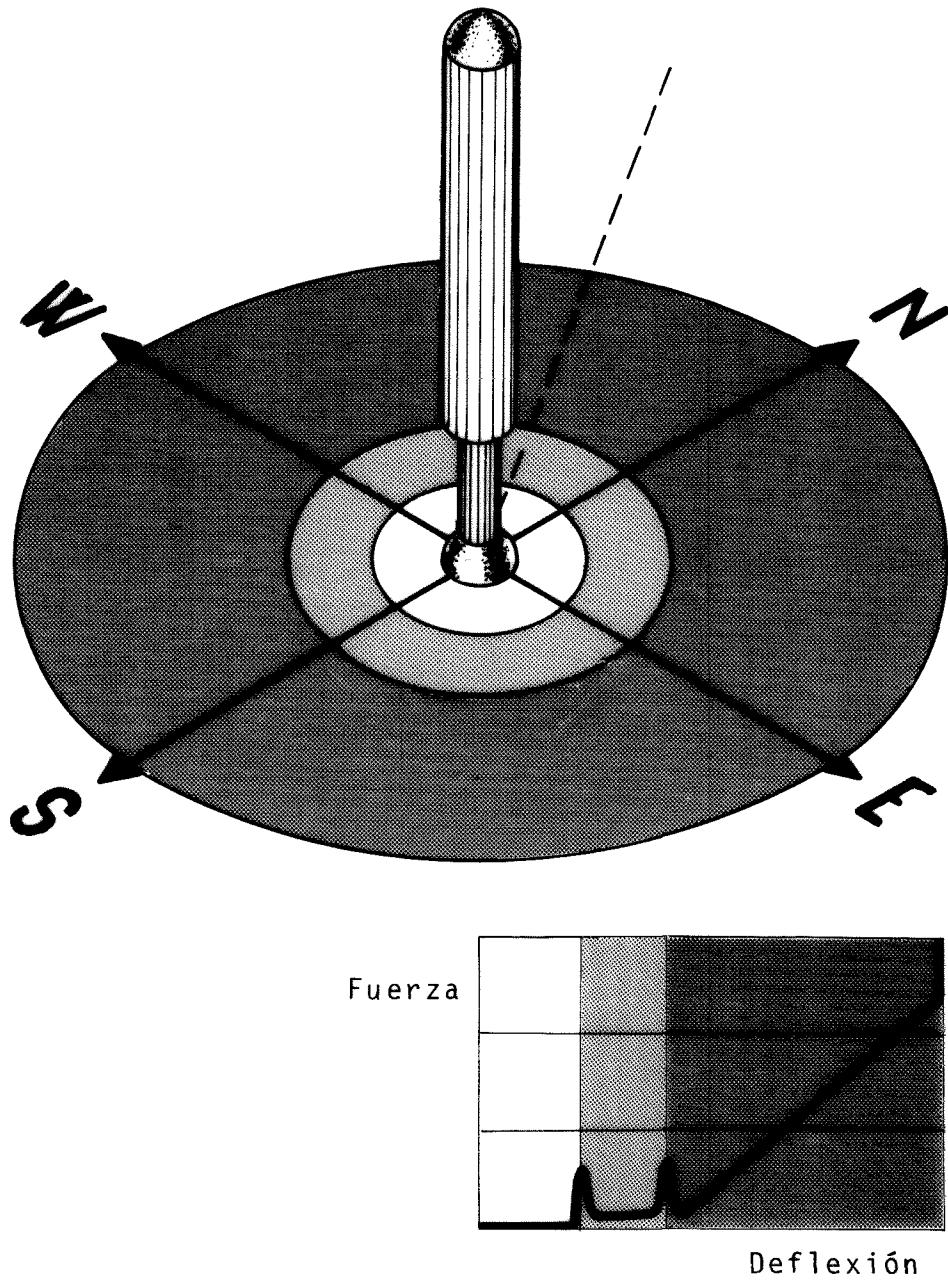


Fig. 5. Esquema de un mando alternativo para los movimientos axiales del disco 1 y del depósito del líquido. El mando consiste en una palanca que se puede deflectar en cualquier dirección aplicando una fuerza función de la deflexión tal como se muestra en el recuadro inferior.

sencia de aire en el mismo; otra posibilidad apunta hacia la pre  
cisión del sistema de inyección, insuficiente para el manejo de  
pequeños volúmenes. No hay que desdeñar la importancia del fenóme  
no dado que zonas de pequeño volumen son las que se manejan al  
comienzo de la formación de una zona y en la fase final del vaci  
ado.

### Visión de la zona en zonas cortas

Con la configuración normal del FPM, para iniciar la  
formación de la zona se desliza el disco 1 a lo largo de la cá  
mara de ensayos paralelamente a sí mismo hasta tocar al disco 2,  
instante en que se empieza a inyectar líquido a la vez que se re  
tira el disco 1 que va montado en el extremo de su soporte cilín  
drico (que aloja además el depósito del líquido) de diámetro algo  
mayor que el disco. El operador sólo puede ver la cámara de  
ensayos mediante un espejo (utilizado para filmar con la cámara  
B) orientado de forma que el eje óptico pase por el centro de la  
cámara; así, cuando el disco 1 se encuentra del disco 2 a distanci  
as menores que la mitad de la longitud de la cámara, el disco  
queda oculto por su propio soporte y para distancias aún menores  
queda también oculto el disco 2 (Fig. 6). En pruebas hechas con  
el FPM se observó que bajo ningún ángulo de visión es observable  
el eje del disco 2 cuando la distancia entre ambos discos es infe  
rior a unos 7 mm, lo que puede ser particularmente grave en el  
inicio de una zona, ya que no es posible comprobar desde el prime  
r instante si la zona se ha formado o no; esto obligaría a defi  
nir para los especialistas la fase inicial con un cuidado especi  
al (por ejemplo: separar 1 mm los discos e inyectar un cierto

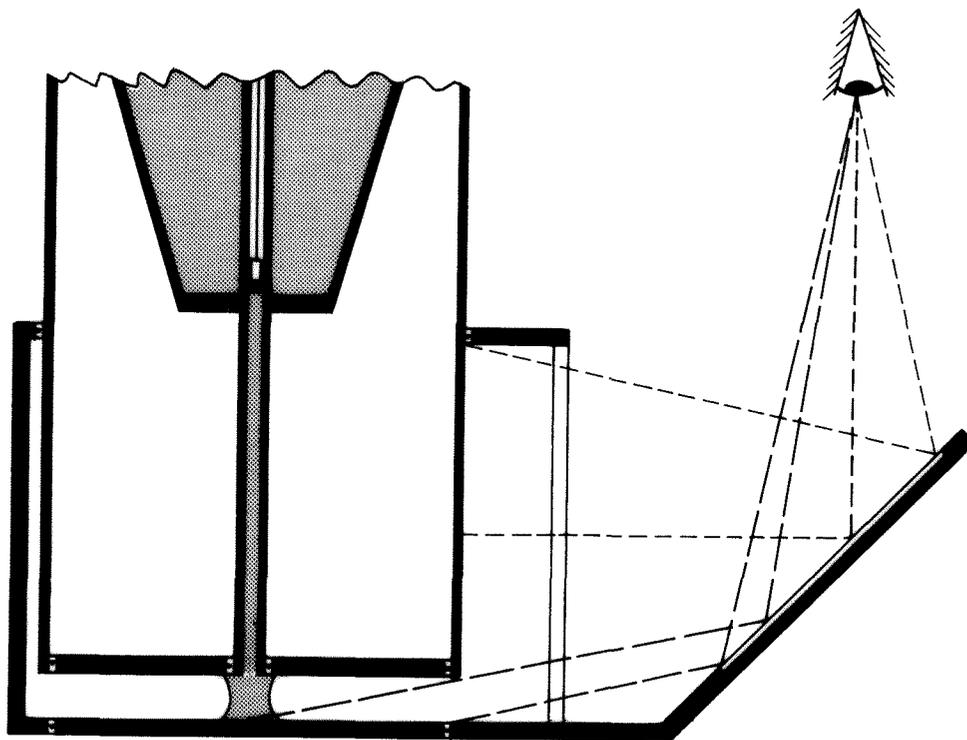


Fig. 6. Zona de sombra; cuando los discos están próximos, el puente líquido queda oculto por el soporte del disco 1.

volumen girándolos para asegurar que se ha formado el puente líquido) pues si no podrían ocurrir alguno de los siguientes casos:

1º) Que para asegurar el puente se inyecte líquido inicialmente más deprisa que se separan los discos, en cuyo caso el líquido rebasará probablemente el borde de los discos.

2º) Que se haga al revés, inyectar al principio más despacio que se separan los discos, con el peligro de que no dé tiempo a formarse el puente líquido.

Sea como fuere, la zona es inobservable hasta que los discos no están separados 7 mm o más.

Mojado de los discos en el llenado y el vaciado de la zona

Ya se ha apuntado en el apartado anterior la importancia del mojado de los discos al inicio de la inyección. Durante el vaciado el problema es similar en los últimos instantes, por lo que parece imposible que se pueda ir extrayendo líquido a la par que acortando la zona de un modo continuo hasta que la longitud y el volumen de la zona sean cero; lo que se hará, será juntar los discos hasta una cierta distancia a la vez que se extrae líquido y a partir de ese instante, con los discos fijos, continuar succionando líquido de la zona corta resultante hasta que se rompa. Si la zona es suficientemente corta y el mojado uniforme llegará un momento que la zona se retraiga de los bordes de los discos avanzando la superficie libre axilsimétricamente hacia el centro hasta que su esbeltez sea tal que se rompa el puente. Pero si el mojado no es uniforme, lo más probable es que la zona no se desprenda axilsimétricamente de los bordes de los discos, avanzando la superficie libre hacia el orificio de inyección más deprisa por unos sitios que por otros, lo que obligaría a finalizar la recogida de líquido (con los consiguientes problemas de limpieza adicionales) ante el peligro de que al llegar la superficie libre al orificio se aspire aire hacia el depósito, lo que se debe evitar a toda costa.

Sería necesario el estudio de sustancias que aseguraran un mojado uniforme o la adición de instrucciones a la secuencia establecida (por ejemplo, girar los discos en contrarrotación) para la etapa final de la recogida a fin de evitar el peligro señalado.

### Revelado no-estándar

De los tres tipos de película utilizados, dos de ellos (los tipos S0-115 y 2476) requieren un revelado especial, no realizado por las casas comerciales, lo que complica el proceso y reduce su fiabilidad. Posiblemente a causa de una deficiente manipulación de la película durante el revelado gran parte del material impresionado presenta los bordes velados, llegando en algún caso a enmascarar totalmente la información contenida en los fotogramas.

Asímismo imputable al revelado, o a las instrucciones recibidas sobre los parámetros de filmación, son los malos resultados obtenidos con las películas S0-115 y 2476 habiéndose perdido la mayor parte de la información en las películas del primer tipo y siendo de no muy alta calidad las del segundo.

### Ensamblamiento del portacassette en la cámara

Durante uno de los ensayos, debido a un defecto en el sistema de ensamblamiento entre el portacassette y la cámara, se rompió la película quedando parte de la misma plegada en el hueco existente entre el portacassette y el cassette. Este mismo defecto, el desplazamiento de una pequeña barra que al montar el portacassette desbloqueaba el sistema de arrastre de película, impidió el montaje posterior del portacassette, siendo necesaria su reparación para poder continuar.

### Iluminación

Aunque estos problemas no aparecieron específicamente en nuestros ensayos, sí se presentaron a otros experimentadores

y se presentarán en nuestro experimento cuando se utilicen las dos cámaras (en ESTEC únicamente utilizamos la cámara B).

Los problemas aparecen cuando se pretende filmar el movimiento de la zona en un plano paralelo al de los discos; los resultados obtenidos por otros investigadores indican que la intensidad luminosa en el plano iluminado es insuficiente para impresionar el material fotográfico de la cámara A, y además, dicho plano incide sobre el espejo y se refleja hacia la cámara B perturbando la imagen lateral de la zona (en los fotogramas aparece una zona velada).

#### Tiempo empleado en la limpieza

Al no disponer de disolventes adecuados para la limpieza tanto del FPM como de los accesorios se empleó un tiempo excesivo en dicha tarea. La búsqueda de sustancias que faciliten la limpieza y que sean compatibles con los materiales del FPM se muestra como una labor importante a la hora de reducir tiempos no productivos en la experimentación.

### 1.5. VERIFICACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS PELICULAS UTILIZADAS

Una vez conocidos los malos resultados obtenidos con la película S0-115 (empleada en los primeros ensayos de familiarización) se planeó la repetición de un ensayo encaminado a establecer los valores óptimos de los parámetros de filmación tanto para este tipo de película como para la del nuevo tipo (Video News-Colour) suministrada por ESTEC.

Dado que en las especificaciones de ambas películas se

sugiere que su utilización idónea es para la captación de la forma externa de la zona, el ensayo se limitó a fotografiar una zona en reposo, con iluminación de fondo y funcionando la cámara B en el modo BRIEF EXP., para distintos ángulos del obturador y varias aperturas de diafragma. En la Tabla 7 se muestran los pares de valores (obturador-diafragma) probados, indicándose también con qué combinaciones de los parámetros se obtuvieron resultados aceptables.

Tabla 7

Resultados obtenidos con las películas S0-115 y Video News-Colour. En los ensayos se probaron todas las combinaciones incluidas en la Tabla, indicándose con un asterisco aquellas que ofrecieron buenos resultados.

Película	Angulo del Obturador	Apertura del Diafragma				
		2.8	4	8	11	16
S0-115	30°			*	*	*
	70°				*	*
	110°					
Video News-Colour	30°		*	*	*	*
	70°			*	*	*
	110°			*	*	*

La definición óptima de las imágenes se obtendrá fotografiando con la menor apertura de diafragma (para aumentar la profundidad del campo) compatible con la iluminación existente, y con un ángulo de apertura del obturador que dé lugar a un tiempo de exposición aceptable para el tipo de película utilizado y para el fenómeno que se desee registrar. Con las dos películas

ensayadas es posible emplear la mínima apertura del diafragma, 16, y también el menor de los ángulos del obturador,  $30^\circ$ , que proporcionan una exposición aceptable sin producir saturación.

Para determinar la resolución alcanzada con ambos tipos de película se realizaron micrografías (ampliando 380 veces) de los negativos mejor definidos (los obtenidos, en cada película, con diafragma 16 y obturador  $30^\circ$ ). En la Fig. 7 se muestran estas micrografías junto con los valores del ancho de la banda de transición de la zona clara a la oscura, H, que corresponde a la indeterminación existente en la posición de la línea del contorno de la zona. El error con que vendrán afectadas las medidas de la posición de dicha línea será de orden de H siendo, como se ve en la figura, menor en el caso de la película S0-115.

Con la película 2476, empleada para el registro simultáneo de la forma externa y del movimiento en el interior de la zona, no hubieron problemas de filmación ni de revelado aunque sí con la concentración verdadera de trazadores que resultó insuficiente para poder extraer una información relevante a partir de las fotografías tomadas (dada la flotabilidad de los trazadores éstos ascendieron hacia la parte superior del depósito por lo que la concentración aparente de trazadores en el líquido inyectado en la zona era notablemente inferior a la recomendada). Para completar el panorama de las películas utilizadas, también se han realizado micrografías de las películas de este tipo, 2476, ampliando 125 veces negativos obtenidos con apertura de diafragma 4 y obturador  $110^\circ$ , valores impuestos por el modo de iluminación (en un plano meridiano). Estas micrografías se muestran también en la Fig. 7 y, como se puede apreciar, la forma ex

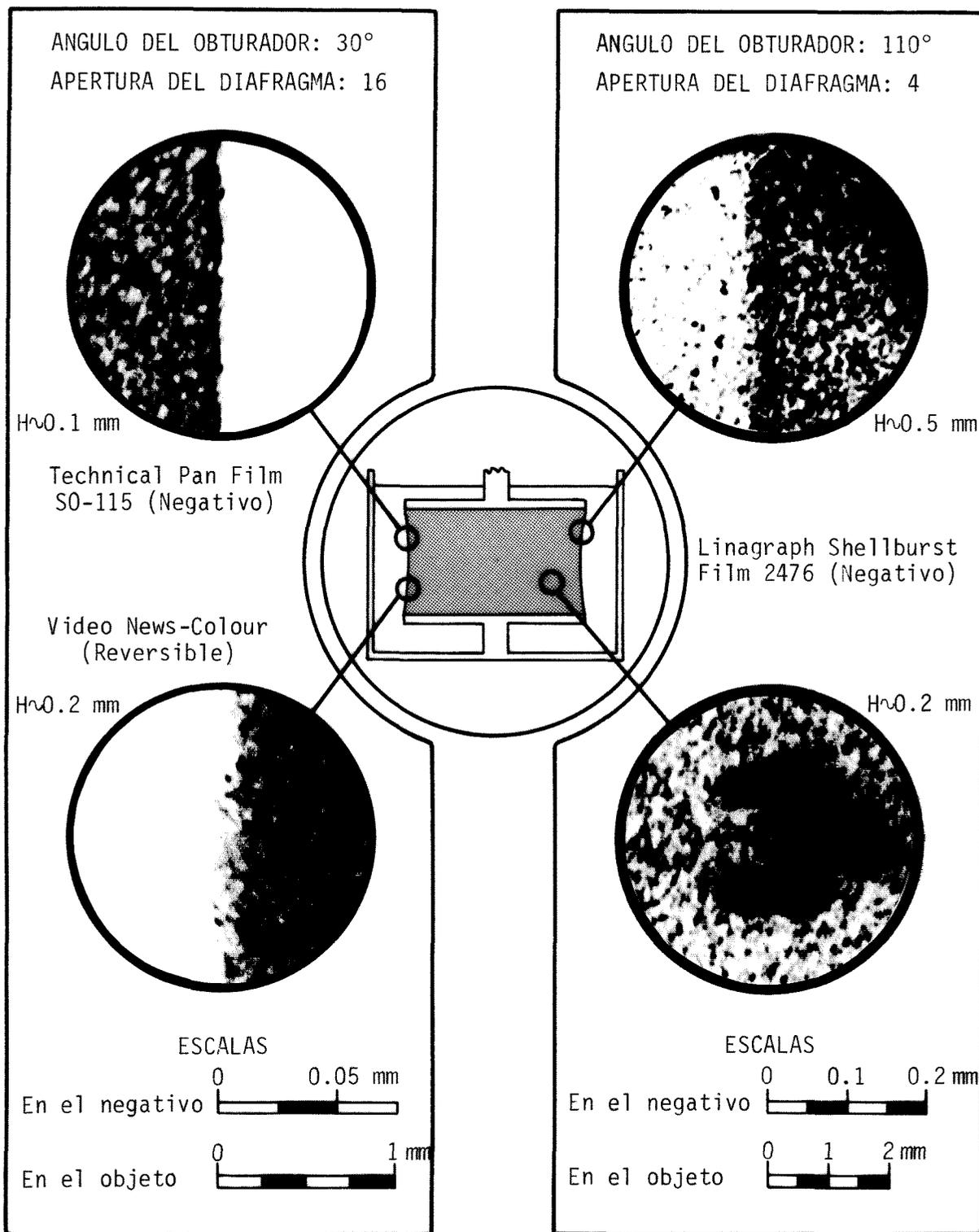


Fig. 7. Micrografías de las películas fotográficas obtenidas en los ensayos de ESTEC. H indica el ancho, en verdadera magnitud, de la zona de transición de las diversas áreas (claras y oscuras) que aparecen en las micrografías.

terna presenta un contorno unas 5 veces peor definido que en el caso de la película S0-115, empeoramiento debido a que, por una parte, al ser una película de mayor sensibilidad el tamaño de grano es mayor y en consecuencia menor la resolución, y por otra, a la apertura del diafragma, más abierto que en los casos anteriores.

En cuanto a los trazadores, el contorno de los mismos presenta una mayor definición que el de la zona y por tanto el error en la medida de la longitud de los trazos registrados es menor. Sin embargo, hay que señalar que el ancho de las huellas que aparecen en las fotos es unas 10 veces mayor que el diámetro medio de los trazadores, del orden de 0.06 mm, fenómeno que puede atribuirse en parte a la gran apertura de diafragma necesaria para fotografiar con la película 2476, y también a la saturación de la película por la luz reflejada en la superficie casi especular de los trazadores.

Como resumen, se puede concluir que son correctas las especificaciones dadas por FIAT (véase Tabla 1, Nota a) respecto a las películas fotográficas propuestas (S0-115 y 2476) aunque sería conveniente algunos ensayos con película 2476 (no necesariamente en el FPM) a fin de acotar más claramente los errores asociados a la medida del campo de velocidades en el interior de la zona. Lo que sí puede ser particularmente grave es que los tipos de película seleccionados precisen de un revelado especial distinto de los comerciales en uso. De utilizarse estas películas a bordo del Spacelab será necesario poner un especial cuidado en el proceso de revelado para evitar que se pierda la información por un tratamiento inadecuado, como ocurrió en nuestro ca

so con las primeras tomas con la película S0-115.

Respecto a la película reversible Video News-Colour, los ensayos realizados muestran que podría utilizarse para registrar la forma externa de la zona sin que su uso signifique una pérdida de calidad. Lamentablemente, debido a la falta de tiempo, no se hicieron en ESTEC ensayos con esta película para fotografiar el movimiento interno, ensayos que se deberán hacer en un futuro próximo para establecer si esta película podría o no sustituir satisfactoriamente a la 2476 pues, de ser posible la sustitución, se llegaría a la solución óptima para los experimentos en el espacio: una única película para todos los ensayos que además se pudiera revelar en cualquier laboratorio mediante un proceso estándar.

#### 1.6. COMPARACION ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES

Como es sabido, las únicas conclusiones que podrán obtenerse de la experimentación en el espacio se deberán extraer del análisis de las fotografías realizadas, ya que éstas, junto con una grabación en cinta magnética del conjunto de señales procedentes de los diversos subsistemas del FPM (tiempos, temperaturas, señal de funcionamiento de las cámaras, etc.) imprescindibles para la interpretación de las fotografías, serán los únicos resultados disponibles por los investigadores.

Durante los ensayos en ESTEC esta información auxiliar hubo de ser registrada manualmente por los experimentadores, dado que no se dispuso del equipo de grabación necesario para este fin. Así pues, el material utilizado como base para la comparación de los ensayos experimentales con los desarrollos teóricos

son las fotografías obtenidas en ESTEC junto con las anotaciones personales realizadas durante las sesiones de ensayo.

Habida cuenta de las inevitables diferencias existentes entre la secuencia propuesta para el experimento 1-ES-331 y los ensayos realizados, la comparación experimentos-teoría se ha limitado al análisis de los fotogramas obtenidos durante una de las secuencias de rotura (la segunda de las mencionadas en la Tabla 1) en la que se obtuvieron fotografías de calidad aceptable.

La secuencia de rotura, que se realizó en varias etapas como se muestra en la Tabla 8, se hizo extrayendo líquido sin mover los discos, siguiéndose una evolución cuasiestática a esbeltez constante a partir de una zona cilíndrica de esbeltez  $L/D=0.43$  comprendida entre discos planos de 80 mm de diámetro y contenida en el recipiente paralelepípedo.

Tabla 8

Parámetros de la secuencia de rotura

Velocidad del depósito [mm/s]	Intervalo entre fotografías [s]	Número de imágenes tomadas
0.2	1	50
0.1	1	20
0.1	0.5	160

En la Fig. 8 se muestran algunas de las fotografías correspondientes a esta secuencia. Al comparar la forma de estas zonas con las obtenidas teóricamente es necesario comprobar la validez de esta comparación, ya que los análisis teóricos se han realizado en la hipótesis de ausencia de movimientos en el

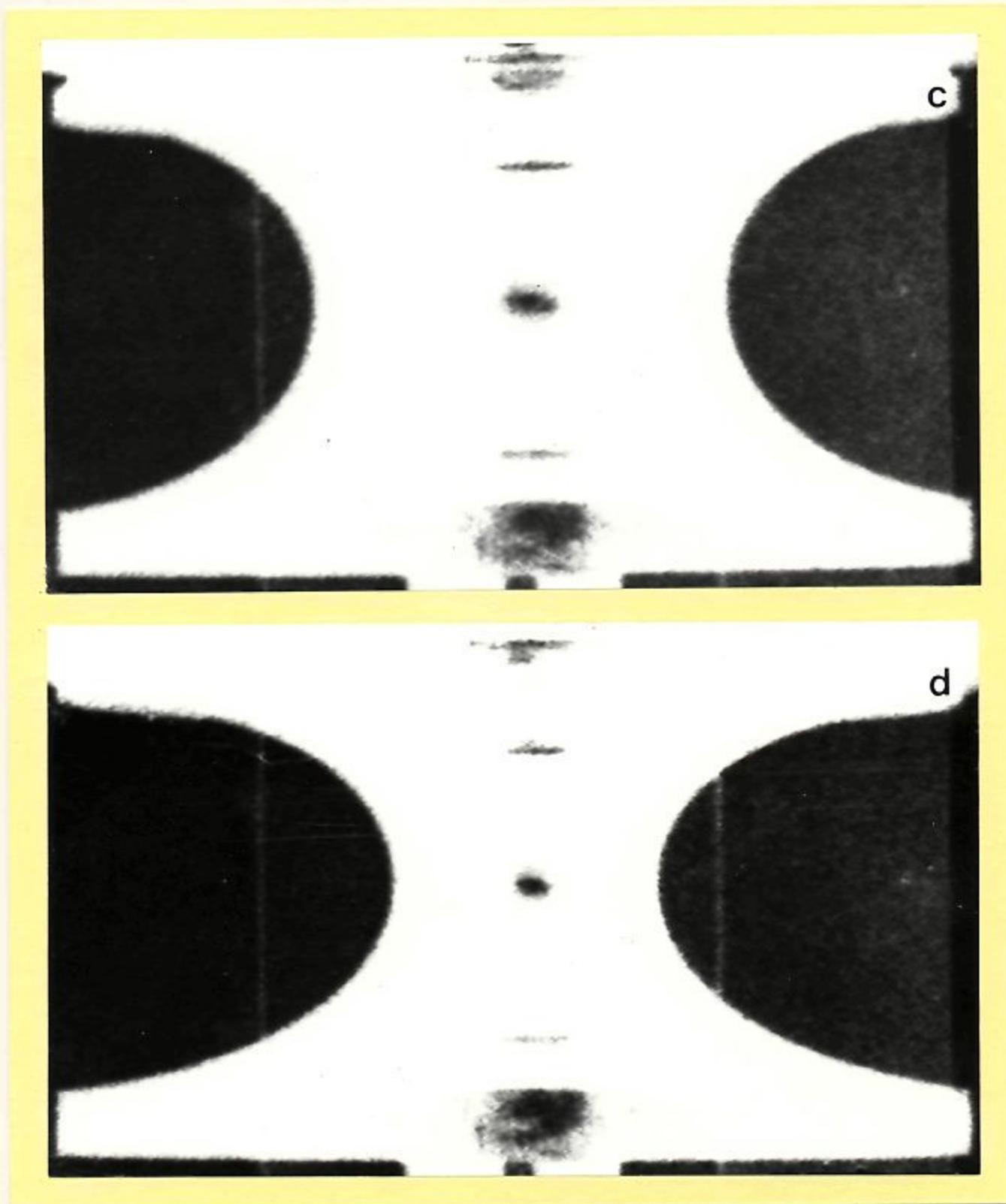


Fig. 8 (Continuación). Rotura de una zona por extracción de líquido manteniendo la esbeltez constante (véase Tabla 9).  
c - Configuración de la zona transcurridos 100 s.  
d - Configuración de la zona transcurridos 125 s (esta configuración ya es teóricamente inestable).

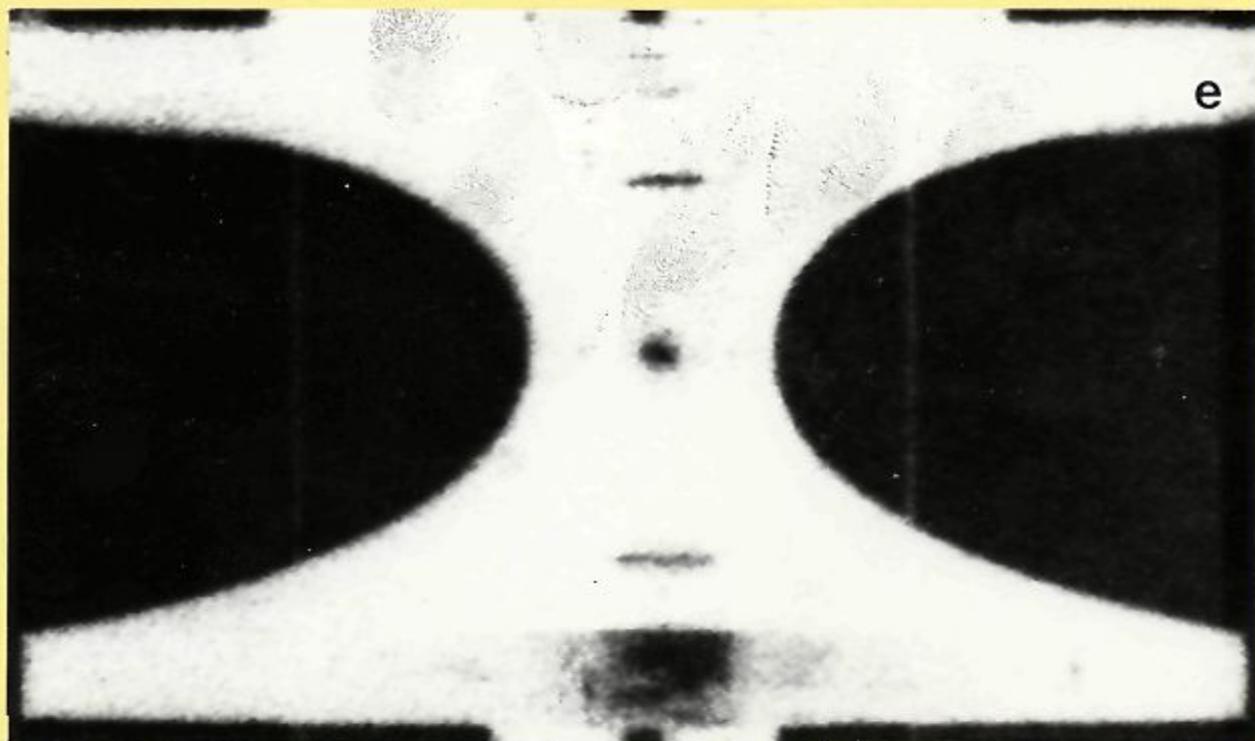


Fig. 8 (Continuación). Rotura de una zona por extracción de líquido manteniendo la esbeltez constante (véase Tabla 9).  
e - Configuración de la zona (inestable) transcurridos 132 s.  
f - Última fotografía obtenida antes de la rotura,  $t=134$  s.

interior de la zona, [6], mientras que en las fotografías se muestra un proceso dinámico. La validez para la determinación teórica de la forma externa de una zona se puede extender al caso dinámico siempre que la configuración en estudio no haya sobrepasado ni esté próxima al límite de estabilidad estática y que, además, el movimiento en el interior de la zona no afecte sensiblemente a la superficie de la misma.

Si la configuración no es estable cualquier perturbación origina un movimiento que puede llegar a ser muy rápido y que tiende a llevar la zona hacia una nueva configuración de equilibrio de menor energía, no siendo válido durante este proceso el análisis estático. Es preciso señalar que esta evolución de la zona no tiene por qué abocar siempre en la rotura del puente líquido pues en algunos casos, antes de la rotura, la zona se desprende del borde de los discos retrocediendo la línea de contacto de la superficie libre, con lo que el resultado es una zona generalmente no axilsimétrica y de mayor esbeltez.

En el estudio de la forma de la superficie libre será posible despreciar los efectos del movimiento interior de la zona, siempre que los esfuerzos viscosos y las presiones dinámicas asociadas al movimiento del líquido en la superficie libre sean pequeñas comparadas con la presión capilar, y estén uniformemente repartidas a lo largo de la misma.

Para estimar las velocidades inducidas por la extracción en la superficie libre, se ha empleado un modelo de movimiento fluido no viscoso generado por un conjunto infinito de sumideros alineados en el eje, espaciados una distancia doble de la separación entre los discos, Fig. 9, con el fin de cumplir la con

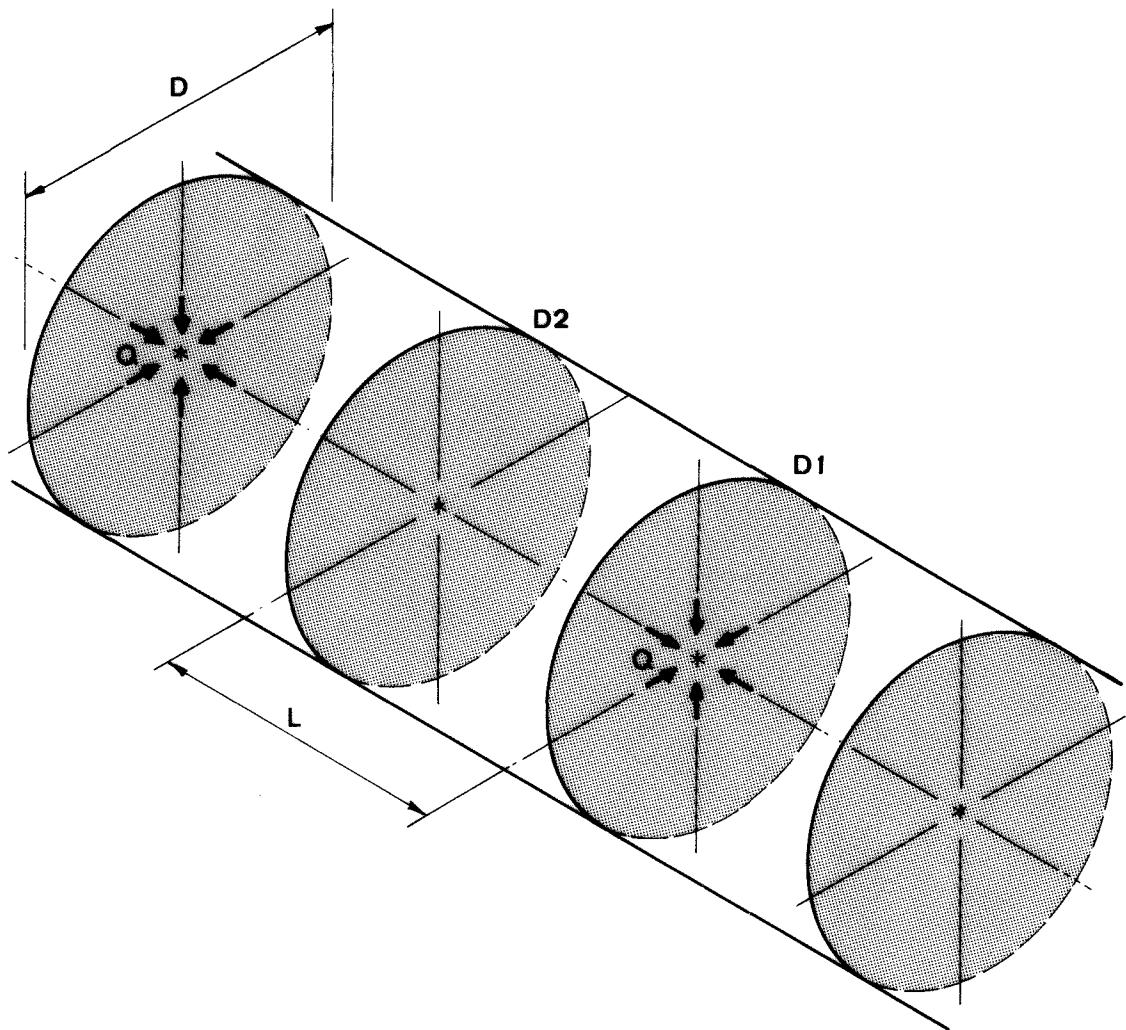


Fig. 9. Modelo de sumideros para el cálculo de las velocidades en la superficie libre debidas a la extracción de líquido.

dición de contorno en los mismos (velocidad normal nula). Las velocidades radiales en la superficie libre, que producirían el movimiento de la misma, obtenidas con la hipótesis anterior, tienen valores comprendidos entre los de la velocidad en el borde del disco 1,  $U_1$ , y en el borde del disco 2,  $U_2$ , que son las siguientes:

$$U_1 \frac{\pi D^2}{Q} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1 + 16 \left( \frac{L}{D} \right)^2 n^2 \right]^{-3/2}$$

$$U_2 \frac{\pi D^2}{Q} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1 + 16 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left( n - \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{-3/2}$$

donde Q es el gasto de inyección, L la distancia entre discos y D el diámetro.

Los valores de ambas velocidades,  $U_1$  y  $U_2$ , adimensionalizadas con  $Q/\pi D^2$ , que se han obtenido considerando una esbeltez,  $L/D$ , de 0.5, son 1.23 y 0.8, respectivamente, ambas de orden unidad ( $U \sim Q/\pi D^2$ ), lo que asegura una distribución del campo de velocidades relativamente uniforme a lo largo de la superficie. El balance entre la presión dinámica,  $\frac{1}{2} \rho U^2$ , donde  $\rho$  es la densidad del líquido y U es una velocidad característica del movimiento, y la presión capilar,  $\frac{2\sigma}{D}$ , donde  $\sigma$  es la tensión superficial, viene dado por el número de Bond,  $B = \frac{\rho U^2 D}{4\sigma}$ , que en este caso se puede escribir como  $B = \rho Q^2 / 4\pi^2 D^3 \sigma$ , cuyo valor, considerando los valores de los parámetros durante el experimento:  $Q = 0.8 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D = 80 \text{ mm}$  y  $\rho/\sigma = 4 \cdot 10^4 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ , resulta ser del orden de  $10^{-6}$ , lo que justifica el no tener en cuenta los efectos dinámicos en el cálculo de la forma de la superficie. (\*)

En la Fig. 10 se muestran las líneas de contorno de la zona en diversos instantes del experimento junto con las calculas teóricamente para esos mismos instantes y en la Tabla 9 se recogen las características de ambas familias de curvas: experimentales y teóricas. Las tres primeras curvas teóricas están calculadas con los mismos valores de volumen y esbeltez que tiene

---

(\*) El valor de  $\rho/\sigma$  utilizado para el cálculo del número de Bond corresponde al de la Dimetil Silicona. Este valor es próximo al de la mezcla DBF-DOF y se ha utilizado como sustitutivo por no disponer de datos fiables sobre este último producto.

la zona en los instantes en que están tomadas las fotografías correspondientes, ajustándose bien los resultados en lo que se refiere a las curvas a y a'; la diferencia aumenta conforme disminuye el volumen (se va haciendo cada vez mayor, como se observa al comparar los pares de curvas b-b' y c-c') aumentando más en la parte derecha de la figura que en la izquierda. La curva d', que es la última calculable mediante la teoría estática, representa el contorno de la zona cuando ésta se encuentra en el límite de estabilidad. Las curvas d, e y f corresponden a los contornos de la zona en instantes posteriores; es decir, una vez rebasado el límite de estabilidad. En estas curvas se puede apreciar el proceso dinámico por el considerable cambio en la forma de la superficie para intervalos de tiempo reducidos.

Tabla 9

Características de las curvas experimentales y teóricas que se muestran en la Fig. 10

Denominación en la Figura		Tiempo	Volumen	COMENTARIOS
Curvas Experimentales	Curvas Teóricas	[s]	$V/D^3$	
a	a'	0	0.319	Zona estable
b	b'	40	0.200	
c	c'	100	0.695	
	d'	116	0.070	Límite de estabilidad
d		125	0.057	Zona inestable
e		132	0.047	
f		134	0.044	Zona inestable, última fotografía antes de la rotura.

En contraste con las líneas teóricas, las curvas experimentales muestran una cierta falta de simetría con respecto al

eje y con respecto al plano medio normal al eje, así como un comportamiento particular en las proximidades del disco 1 y que podrían atribuirse a las siguientes causas:

- i) el efecto de proyección, debido a la distancia finita del objeto a la cámara fotográfica, lo que deformaría en mayor cuantía la parte superior de la imagen que la inferior, por encontrarse esta última más cercana al eje óptico;
- ii) la existencia de una cierta flotabilidad residual debida a una pequeña diferencia entre las densidades del líquido y del baño;
- iii) el desprendimiento, no deseado, de la línea de mojado de la superficie libre del borde del disco 1.

El efecto espacial no es por sí mismo capaz de justificar ambos fenómenos ya que como se muestra en la Fig. 11, donde se puede observar una simulación de la proyección cónica de la zona en el límite de estabilidad (calculada teóricamente), el contorno es simétrico y con un comportamiento en las proximidades del disco 1 más suave que los experimentales.

La explicación del comportamiento anómalo de las líneas de contorno en las fotografías puede hacerse considerando las dos últimas causas señaladas, para lo que resulta conveniente considerar la evolución seguida por la zona durante la secuencia de rotura. En la Fig. 12 se ha representado, sobre un gráfico de las posibles formas de equilibrio, [6], la evolución teórica que debería haber realizado el puente líquido hasta romperse; este proceso está representado por la recta OD (esbeltez constante) y como se muestra en la figura dicha recta pasa muy próxima al lími-

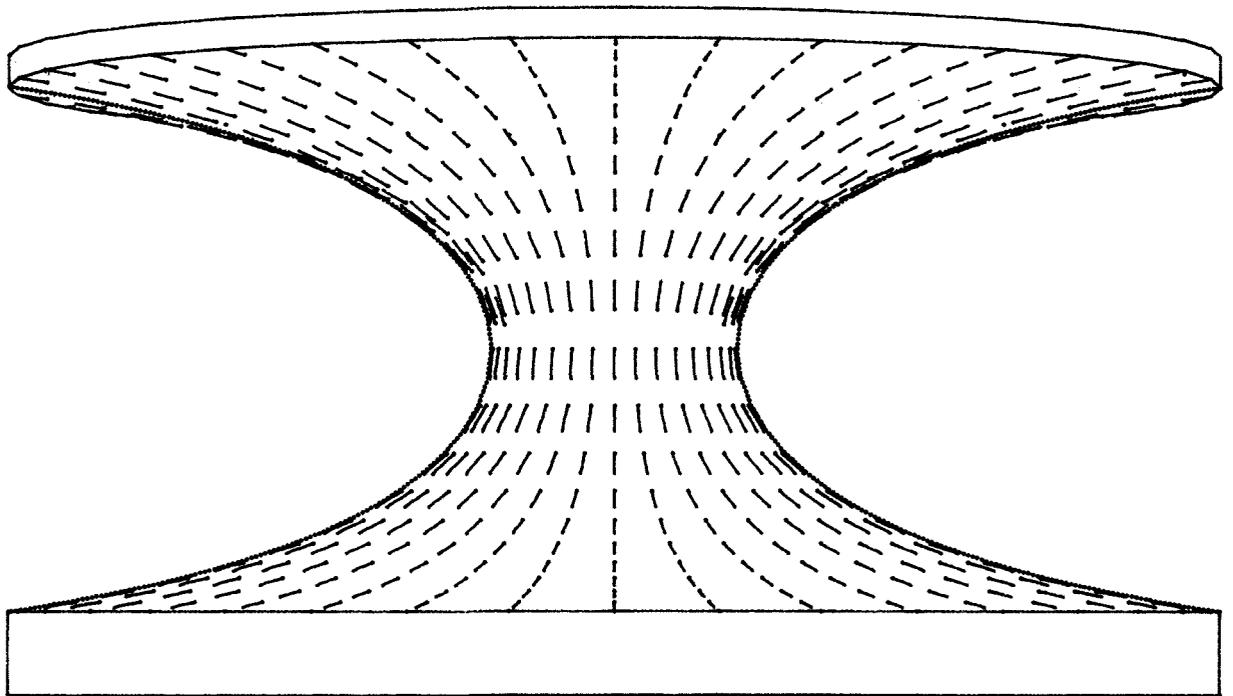


Fig. 11. Influencia de la perspectiva en el contorno de una zona flotante. La figura se ha obtenido suponiendo que el eje óptico pasa por la cara superior del disco 2 y como se observa, el contorno de la zona es diferente que el que se vería al cortar por un plano meridiano (línea de puntos).

te de estabilidad a partir del cual se produce el desprendimiento de la línea de mojado del borde de los discos (obviamente, cualquier perturbación podría iniciar este fenómeno antes de que, siguiendo la evolución teórica, la zona llegara al límite de estabilidad de volumen mínimo). La falta de simetría respecto al plano medio entre los discos, incluso antes de acercarse la zona al límite de estabilidad por desprendimiento de los bordes, parece indicar la existencia de una flotabilidad residual que sería la causante, añadida a la proximidad al mencionado límite, del desprendimiento de la línea de mojado del disco 1.

Como ya se ha dicho anteriormente, se ha observado que

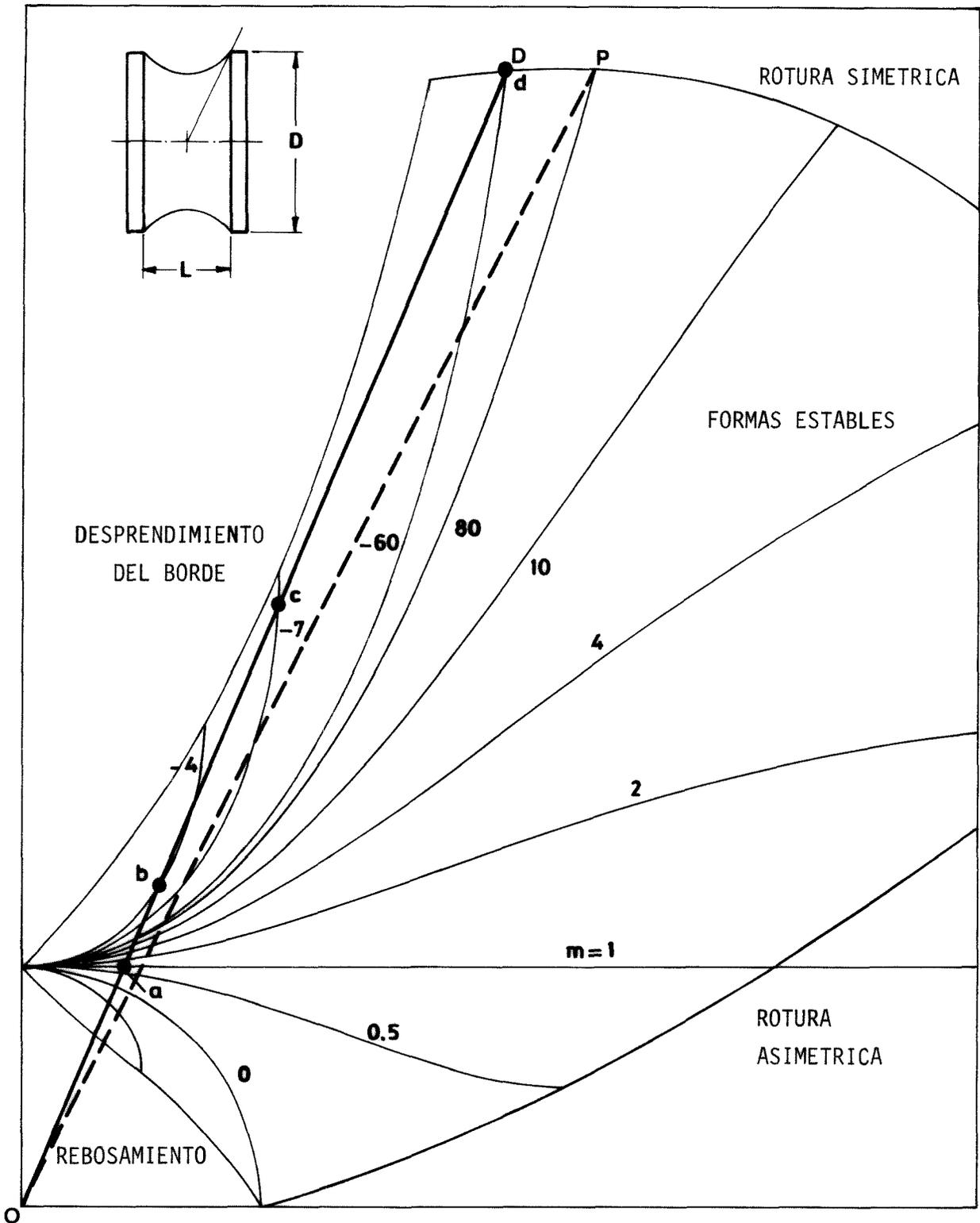


Fig. 12. Secuencias de vaciado de zonas cortas en el diagrama de formas de equilibrio [6]. Los puntos a, b, c y d se corresponden con las zonas de igual denominación mostradas en la Tabla 9.

———— Esbeltez  $L/D=0.43$

----- Esbeltez  $L/D=0.50$

el desprendimiento de los bordes no es axilsimétrico, sino que comienza en una parte de la línea de mojado propagándose después al resto de la misma. Una vez que la línea de mojado se ha desprendido no tiene por qué producirse inmediatamente la rotura de la zona, y en tal caso se podrá seguir extrayendo líquido hasta alcanzar el límite de estabilidad de volumen mínimo, que no es el mismo para zonas con los bordes desprendidos que para zonas con los bordes anclados; además, al ocurrir el desprendimiento (por el efecto de la flotabilidad residual) de la línea del borde del disco 1 solamente, la forma resultante tampoco será simétrica respecto al plano medio normal al eje, y mostrará un cuello de mayor diámetro que si la evolución hubiera sido normal.

Para observar este fenómeno se puede dibujar el diámetro del cuello de la zona,  $D_m$ , adimensionalizado con el diámetro de los discos,  $D$ , en función del volumen adimensional de la zona,  $V/D^3$ , como se muestra en la Fig. 13. En dicha figura se puede observar que durante la fase inicial de la extracción (para volúmenes adimensionales comprendidos entre 0.34 y 0.2 aproximadamente) los valores experimentales, aun siendo superiores a los teóricos, se ajustan mejor a los teóricos, lo que indica un retraimiento progresivo de la línea de mojado en el disco 1.

Con todo, una grave dificultad para observar el desprendimiento en las fotografías seleccionadas es el hecho de que la única información disponible en las mismas es la posición de la línea de contorno de zona y discos por lo que es difícil, a partir de estas pruebas, obtener una idea tridimensional del fenómeno. En los ensayos realizados con la película 2476, aunque el fin era fotografiar el movimiento en el interior de la zona, también

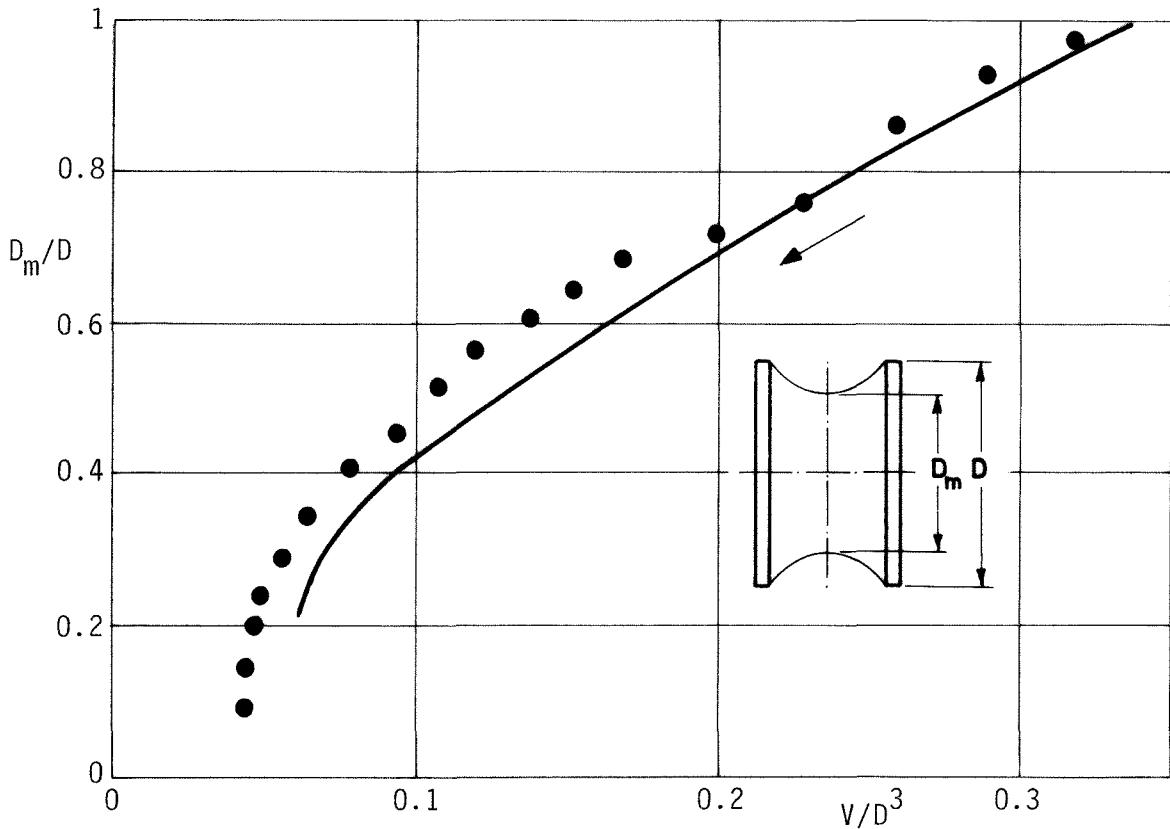


Fig. 13. Variación del diámetro en el cuello de la zona adimensionalizado con el diámetro de los discos,  $D_m/D$ , en función del volumen adimensional,  $V/D^3$ . — Variación teórica. ● Valores experimentales.

se registró la forma externa (si bien con menos nitidez que con los otros tipos de película) apareciendo ciertos detalles no apreciados en las fotografías realizadas con la S0-115. En la Fig. 14 se muestra una de las fotografías obtenidas durante la rotura en el ensayo de comprobación de la secuencia del experimento 1-ES-331 (véase Tabla 1) en la que se observa claramente el desprendimiento de la línea de mojado del borde del disco superior, desprendimiento que ocurre a pesar de que el proceso de rotura (línea OP de la Fig. 12,  $L/D=0.5$ ) se realizó más lejos del límite de estabilidad por desprendimiento ya que en este ensayo la zona tenía mayor esbeltez.

En resumen, las limitaciones geométricas impuestas por los apéndices introducidos en la cámara de ensayos del FPM durante la experimentación en ESTEC (recipientes, soportes y discos auxiliares) obligaron a realizar ensayos con zonas muy próximas al límite de estabilidad por desprendimiento del borde de los discos, lo que ocurrió en los procesos de rotura comentados en este apartado.

Un aspecto de la secuencia de rotura mostrada en las Figs. 8 y 10 que puede causar extrañeza es el tiempo moderadamente alto que transcurre desde que la zona sobrepasa el límite de estabilidad hasta que se rompe (el puente líquido se mantiene, pasado este límite, durante unos 20 s más y en la fotografía siguiente a la última incluida en la serie de la Fig. 8 la zona ya está rota; ciertamente el límite de estabilidad predicho está basado en la hipótesis de zona anclada y, como se observa en las fotos, la zona está desprendida del borde del disco 1, lo que alejaría dicho límite). Se tenía la idea de que una vez rebasado el límite de estabilidad la rotura ocurría casi instantáneamente y para aclarar este punto se han realizado, con posterioridad a las sesiones de ensayos en ESTEC, diversas pruebas en el Lamf en las que se han fotografiado roturas de zonas utilizando diversos tiempos de exposición. En la Fig. 15 se muestran las fotografías de una zona de esbeltez  $L/D=2$  en una situación próxima a la de rotura. En ambas fotografías la forma inicial (línea continua) es la misma, pero, sin embargo, la final (representada por las líneas a trazo) que se ha dibujado aproximadamente atendiendo al movimiento de los trazadores, es radicalmente diferente de una a otra fotografía. En la fotografía a), realizada con un tiempo de

Fig. 15. Fotografías de la rotura de una zona obtenidas en el Lamf con diferentes tiempos de exposición T. a)  $T=0.5$  s, b)  $T=1$  s. La zona se ha realizado con Dimetil Silicona (20 cs) en un baño de alcohol y agua. La línea continua representa la posición inicial y la línea de trazos la posición final estimada en función de la huella dejada por los trazadores.

exposición  $T=0.5$  s el contorno apenas si ha variado, mientras que en la fotografía b), obtenida con un tiempo de exposición  $T=1$  s, la zona ya se ha roto. Esto parece indicar la existencia de dos regímenes en el proceso de rotura una vez sobrepasado el límite de estabilidad: primeramente tiene lugar una etapa de estrechamiento del cuello en la que las velocidades son pequeñas y en la que deben ser dominantes los efectos viscosos; pasada esa etapa, cuando el estrechamiento del cuello ha llegado a un cierto límite, el movimiento se acelera bruscamente (el último medio segundo en la fotografía b)) y el puente líquido se rompe en dos partes que quedan ancladas a los discos, aunque también es frecuente que aparezcan pequeñas gotas de líquido (satélites de Plateau), señal de que el puente líquido se ha fragmentado rompiendo por varias secciones a la vez.

### 1.7. CONCLUSIONES

No es sencillo establecer qué incidencia pueden tener los ensayos realizados en ESTEC sobre el desarrollo futuro del experimento 1-ES-331, dado que existen otros muchos factores en juego que pueden afectar más profundamente la evolución del programa de investigación en curso, en particular las continuas demoras en la fecha de lanzamiento del Spacelab (que ya lleva tres años de retraso) y los factores económicos que ello trae consigo. Sin embargo, sí hay un aspecto de fácil valoración y es el referente a la integración FPM-experimento.

Aunque en estas páginas pueda parecer que se hace una crítica excesivamente severa del FPM, no hay que olvidar que el espíritu con que se abordó la experimentación en ESTEC fue el de

someter el módulo al primer examen minucioso para poner de manifiesto sus limitaciones y desventajas con vistas a posibles mejoras. Esto no quiere decir que el FPM tenga insalvables fallos de diseño; es lógico dar por supuesto que un aparato de tal envergadura proveerá de unas sofisticadas facilidades de experimentación, y de lo que se trata con estas verificaciones es de sacar a la luz los puntos oscuros para tomarlos en consideración.

Así pues, aunque el FPM cumple una mayoría de los requisitos necesarios para nuestro experimento, falla en unos pocos, y hay que tener en cuenta que posiblemente un solo fallo sea suficiente para hacer fracasar el experimento cuando se realice a bordo del Spacelab.

Las conclusiones obtenidas se pueden clasificar en tres categorías, si bien no existe una separación clara entre unas y otras. Un grupo sería el referente a las limitaciones del FPM y las mejoras a introducir, otro el relacionado con los cambios que se deben introducir en la secuencia propuesta para el experimento a la vista de las limitaciones señaladas en la categoría anterior y el último, que hace referencia a los aspectos que requieren un estudio más profundo antes de poder emitir veredicto alguno.

A partir de ahora los esfuerzos de los experimentadores del área de Física de Fluidos, tomando como base la experiencia adquirida en ESTEC, debe centrarse en dar solución a los problemas planteados que, limitándonos a nuestro grupo, se pueden resumir en los siguientes:

- i) Búsqueda de alternativas válidas para los subsistemas de funcionamiento dudoso (cámaras fotográficas,

películas fotográficas, control de la inyección, etc.).

- ii) Rediseño de las secuencias de experimentación adaptándolas a las posibilidades reales del FPM, con un control de tiempos de realización estricto (en particular asegurar el inicio de la formación de la zona).
- iii) Estudios teóricos y experimentales complementarios (etapas críticas en la inyección y la rotura, análisis e interpretación de resultados, etc.).

REFERENCIAS

1. Martínez, I., "Zonas Líquidas Flotantes", IAA No. 165, Enero 1977.
2. Lamf, "Columnas Líquidas en Condiciones de Ingravidez", Informe Final 1979, Expediente CONIE 3/79, Madrid, Enero 1979.
3. Martínez, I., "Fluid Physics Module Utilization Brochure", ESA/Lamf-ETSIA, Abril 1979.
4. Lamf, "Columnas Líquidas en Condiciones de Ingravidez", Informe Final 1978, Expediente CONIE PDP 11/79, Madrid, Marzo 1979.
5. FIAT, "Suggestions for FPM Film Exposure and Development", Comunicación privada.
6. Lamf, "Columnas Líquidas en Condiciones de Ingravidez", Informe Final 1977, Expediente CONIE 13/77, Madrid, Febrero 1978.

2. DISEÑO Y FABRICACION DE UN EQUIPO PARA LA EXPERIMENTACION EN TIERRA CON ZONAS FLOTANTES EN CONDICIONES DE MICROGRAVEDAD SIMULADA: PLATEAU TANK FACILITY (PTF)

Agradecemos la colaboración prestada en las tareas de diseño y construcción del equipo a los estudiantes de la ETSIA Damián Rivas y María Antonia Molar por su participación en el diseño y control de la fabricación; a Julio Ester, Donato Rodrigo, Antonio Gargallo y Alonso Fernández por la construcción; a Juan Valero y Gregorio Pastor por la delineación, y a Jesús Sánchez y Santiago Sanz por la mecanografía.

## 2. DISEÑO Y FABRICACION DE UN EQUIPO PARA LA EXPERIMENTACION EN TIERRA CON ZONAS FLOTANTES EN CONDICIONES DE MICROGRAVEDAD SIMULADA: PLATEAU TANK FACILITY (PTF)

### 2.1. NOTAS PREVIAS

I) Dada la naturaleza de este capítulo, en el que se describe un equipo diseñado y construido en el Lamf para la experimentación con zonas líquidas mediante la técnica de la flotabilidad neutra, se ha juzgado conveniente, en aras de una mayor facilidad de manejo, no seguir el orden tradicional adoptado en los demás capítulos de intercalar en el texto figuras y tablas según se van mencionando.

Así pues, en este capítulo, figuras y tablas se han agrupado y, en las páginas siguientes, aparecen en primer lugar el texto, a continuación las tablas y, por último, las figuras y planos.

II) Las explicaciones del equipo se han hecho referidas a las figuras y no a los planos, de carácter más general, incluidos al final del capítulo, los cuales muestran una perspectiva general del aparato (Plano 1), dos vistas del mismo (Plano 2) y diversos cortes de la sección de ensayos (Planos 3 y 4).

III) Para agilizar la descripción del equipo se han utilizado, tanto en la rotulación de las figuras como en el texto, abreviaturas y acrónimos para designar las partes más significativas del aparato. Esta nomenclatura se detalla y explica en la Tabla 1, reuniéndose en la Tabla 2 una lista de las figuras mencionadas en el capítulo.

IV) Por este mismo motivo, en la parte inferior derecha de las páginas del texto se ha estimado conveniente referenciar

las figuras que se mencionan en las explicaciones de cada página.

## 2.2. INTRODUCCION

Una parte importante del programa de investigación del experimento 1-ES-331 está dedicada a la realización de ensayos en tierra simulando condiciones de microgravedad. La técnica de simulación más sencilla es la llamada de flotabilidad neutra (baño de Plateau), técnica especialmente útil en los ensayos estáticos aunque, a priori, de dudosa aplicación para los ensayos dinámicos por la significativa modificación que esta técnica impone en las condiciones de contorno en la superficie, [1]. Para paliar este problema, este año se han iniciado en el Lamf estudios teóricos comparativos sobre el comportamiento dinámico de zonas flotantes en condiciones de ingravidez real y simulada mediante un baño de igual densidad, con la esperanza de que las diferencias entre la teoría y la experimentación con ingravidez simulada sirvan para acotar las diferencias previsibles entre la teoría y la futura experimentación en el espacio.

Ante este requerimiento, habida cuenta que los tanques de Plateau disponibles en el Lamf no ofrecían las características necesarias, a finales de 1979 se abordó el problema del diseño y construcción de un equipo, [2], que permitiese la experimentación con zonas líquidas en baño isométrico sometidas a perturbaciones controladas, análogas a las que se pueden generar en el Módulo de Física de Fluidos (FPM).

El aparato, que en lo que sigue se denominará con las siglas PTF (Plateau Tank Facility), ha sido construido en el Lamf intentando maximizar la relación prestaciones/presupuesto (el cos

te de los materiales utilizados en la fabricación del PTF no supera las 150000 pesetas y el coste laboral se puede estimar, hasta el momento, en unas 200 horas/hombre de ingeniería, 600 horas/hombre de personal auxiliar (ayudantes) y unas 1000 horas/hombre de taller: torneros, fresadores, chapistas, etc.).

El PTF está formado, según se muestra en la Fig. 1, por un recipiente de base pentagonal (el tanque, TQ) que reproduce a escala 1:1 la cámara de ensayos del FPM, en cuyo interior se alojan dos discos entre los que se forman las columnas líquidas. Estos discos pueden realizar ciertos movimientos gracias al equipo motor, EM, situado sobre el tanque; ambos subsistemas, TQ y EM, son soportados por una estructura, ES, que descansa sobre una penna, PN, donde se encuentran el panel de mandos, PM, y diversos compartimentos para guardar el utillaje auxiliar.

Los discos pueden ser de distintos diámetros y realizar los siguientes movimientos:

Disco de inyección o superior (D1)	⎧ Giro en ambos sentidos ⎣ Desplazamiento axial
Disco opuesto o inferior (D2)	

siendo, de entre estos movimientos, el desplazamiento lateral el único accionado manualmente. En la Tabla 3 se resumen los valores de las velocidades y desplazamientos alcanzables con el PTF en su versión actual (y los valores esperados una vez se integren en el aparato los sistemas de regulación actualmente en desarrollo) así como otras características relevantes del aparato.

### 2.3. ESTRUCTURA-SOPORTE

El soporte del PTF, Fig. 2, está formado por la estructura de tubos de hierro de sección rectangular (10 mm x 20 mm) que acaba en la peana de madera.

La estructura consta de tres barras verticales, tres cuadernas rectangulares y una cuarta barra vertical unida a las dos cuadernas superiores. La cuaderna inferior, Q1, está atornillada sobre una plancha de madera, base de la peana, y en tres de sus esquinas están atornilladas las barras verticales que quedan parcialmente embutidas en dicha peana; el tanque se sujeta debajo de la cuaderna Q2 descansando sobre los apoyos móviles AP, y el equipo motor se aloja en el espacio existente entre las cuadernas Q2 y Q3. La cuarta barra vertical no se ha prolongado hasta la cuaderna Q1 para no entorpecer en el área de experimentación y mejorar la visibilidad en el tanque.

La peana, Fig. 3, nace sobre la plancha de madera antes mencionada y lleva una serie de compartimentos: seis cajones en el frontal, C1 a C6, para guardar el equipo auxiliar, y otros dos en la cara superior, el primero, C7, donde se guarda el espejo para fotografiar la zona en un plano normal al eje de la misma y el segundo, C8, donde se alojará el equipo de inyección motorizado (no incluido en la versión actual de PTF). Existe además otro compartimento en el frontal destinado a la caja de mandos del PTF.

### 2.4. EL TANQUE

El tanque está formado por una estructura de chapa de latón, ET, de 1 mm de espesor que se completa con dos tacos de

metacrilato, T1 y T2, que simulan los salientes del sistema de limpieza existentes en la cámara de ensayos del FPM (Fig. 4). En la parte inferior de la estructura se embute un marco pentagonal, PT, que se une a la estructura ET mediante tornillos, dejando un hueco para alojar los mecanismos de los movimientos del disco D2 que sólo son accesibles desmontando el marco PT. La hermeticidad entre marco y estructura se consigue con un sellante de silicona.

Las caras laterales del tanque son cristales, K1 a K5, de 3 mm de espesor sujetos mediante marcos de latón, MC, a la estructura ET y a los tacos T1 y T2 (Figs. 5 y 6). La cara inferior del tanque, Fig. 7, también es de cristal de 3 mm de espesor, K6, y va sujeta al marco pentagonal PT mediante su correspondiente marco de latón. La cara superior del tanque es una chapa de metacrilato, P3, de 6 mm de espesor con un vaciado cilíndrico de 140 mm de diámetro por donde entra en el tanque la camisa cilíndrica sobre la que va montado el disco D1. Esta chapa va provista de un rebosadero RB necesario para la operación de llenado del tanque, así como posicionadores, PS, y taladros para el paso de los ejes necesarios para la unión con el equipo motor (véase Fig. 5). Interiores al tanque, formando las paredes superior e inferior de la cámara de ensayos, hay también dos chapas de metacrilato de 8 mm de espesor. La superior, P1, lleva un vaciado para el paso de la camisa mencionada anteriormente y va unida a la P3 mediante tornillos. La inferior, tiene una parte fija, P2, y una desmontable que se inserta en P2 y que consiste en un anillo de adaptación, A2, con un vaciado de diámetro ligeramente superior al del disco D2, de forma que permita el desplazamiento lateral de dicho disco. Cada uno de los discos D2 tiene su correspondien

te anillo de adaptación, cuyo fin es aislar la cámara de ensayos de las posibles perturbaciones introducidas en el líquido del baño por los mecanismos del disco D2 situados debajo de la chapa P2.

El tanque se sujeta a la estructura ES atornillando los tacos T1 y T2 a dos de las barras verticales, y mediante los apoyos móviles, AP, que también se fijan a las barras verticales de la estructura. Con objeto de aislarlo de vibraciones no deseadas, el contacto entre el tanque y el soporte se realiza a través de arandelas de goma.

El vaciado del tanque se realiza por un orificio de descarga practicado en el cristal inferior K6.

## 2.5. EQUIPO MOTOR

El equipo motor del PTF, Fig. 8, está constituido por un vibrador, VB, para la vibración axial del disco D2, y tres motores: M1 y M2 para el giro de los discos D1 y D2 respectivamente y M3 para el desplazamiento axial del disco D1. Motores y vibrador (cuyas características se resumen en las Tablas 4 y 5 respectivamente) están unidos mediante tornillos a una estructura que se apoya en la parte superior del soporte general (sobre la cuaderna Q3) al cual va atornillada.

Dicha estructura está formada por tres chapas de aleación de aluminio de 4 mm de espesor, P5, P6 y P7, y una cuarta, P4, de metacrilato de 6 mm de espesor. Las tres primeras están separadas por unos distanciadores huecos de latón, DS, por cuyo interior pasan varillas roscadas que se atuercan en sus extremos, consiguiéndose así la rigidez necesaria (los extremos inferiores

de las varillas quedan embutidos en la chapa P4). Las dos chapas inferiores, P4 y P5, están unidas entre sí mediante tornillos y llevan dos vaciados (por donde pasan la camisa y el rebosadero) y los taladros para el paso de los ejes y para los posicionadores que sirven para el ensamblamiento del equipo motor y el tanque poniendo en contacto las chapas P3 y P4.

Los motores M1 y M2 están atornillados a la chapa P7 mientras que el vibrador, VB, y el motor M3 lo están a la P6. Los laterales del espacio limitado por estas dos chapas están protegidos por una caja de madera CM, Fig. 9, cuya tapa superior, TM, se puede abrir para acceder a la placa P7 sobre la que están los engranajes que, en la versión actual del PTF, se utilizan para conseguir distintas velocidades de giro de los discos.

## 2.6. MOVIMIENTOS DEL DISCO SUPERIOR, D1

### 2.6.1. Desplazamiento axial

El disco D1 va montado en el extremo de una camisa cilíndrica, CA, de 140 mm de diámetro y 197 mm de longitud que puede desplazarse según su eje, Figs. 10 y 11. El movimiento se consigue mediante el motor M3 que hace girar conjuntamente dos husillos de latón, HS, unidos uno directamente al motor M3 y otro al anterior a través de una cadena CD; los husillos están sujetos al conjunto P4-P5 mediante unos casquillos de latón embutidos en las placas, y el husillo no unido al motor M3 se sujeta en su extremo superior a la chapa de aluminio P6 a través de un rodamiento.

Los husillos se enroscan en dos tuercas TC adosadas a la camisa que se desplazan verticalmente (y por tanto la camisa)

al girar los husillos.

El contacto de la camisa con el conjunto P3-P4-P5 es por medio de dos juntas de goma, JG, que, además de guiar la camisa, proveen al tanque de la estanqueidad necesaria.

La posición que ocupa la camisa relativa al tanque se muestra en la Fig. 12; la camisa aloja en su interior el sistema de giro del disco D1 y el conducto de inyección CI.

### 2.6.2. Rotación

Como ya se ha dicho, el mecanismo de giro del disco D1 se encuentra parcialmente alojado en el interior de la camisa CA, como se muestra en las Figs. 12 y 13. Cada disco D1 va pegado a su portadiscos, F1, que a su vez se enrosca en una rueda dentada, R1.

El conjunto disco-portadiscos es desmontable para permitir el cambio de disco, existiendo un portadiscos diferente para cada uno de los discos del juego. La rueda dentada R1 va montada mediante un rodamiento, RD, sobre el conducto de inyección, CI, coaxial con la camisa, de forma que al ensamblar portadiscos y disco en dicha rueda el orificio del conducto de inyección queda encarado con un taladro realizado en el disco D1, a través del cual se realiza la inyección.

Para perturbar lo menos posible el líquido del baño, cada portadiscos es de un diámetro levemente superior a su disco correspondiente, cerrándose el resto de la base inferior de la camisa mediante un anillo de adaptación A1.

La rueda dentada R1 engrana en el piñón G1 que gira impulsado por el motor M1 a través de un eje dividido en dos par-

tes: una inferior, E1A, que se muestra en las Figs. 12 y 13 y una superior, E1B, que aparece en la Fig. 14. La parte inferior del eje, E1A, es un redondo de latón de 6 mm de diámetro unido a la camisa, al igual que el conducto de inyección CI, mediante dos discos de posicionamiento, uno superior, DA, que constituye la cara superior de la camisa, y otro intermedio, DM. Para disminuir el rozamiento, el eje E1A va montado sobre rodamientos, RD, embudidos en los discos posicionadores.

La parte superior del eje, E1B, es telescópica para permitir que el giro se pueda transmitir a pesar de los desplazamientos axiales de la camisa, y consta de una varilla exagonal (a cuyo extremo inferior se rosca E1A) que ajusta dentro de un tubo donde puede deslizarse. Dicho tubo está conectado al motor M1 a través de los engranajes G2, G3 y G4 y al girar comunica el giro a la varilla por medio de una pieza de arrastre de orificio exagonal (Fig. 15).

Tanto en el anillo de adaptación, A1, como en los discos posicionadores, DM y DA, se han practicado taladros para permitir el libre paso del aire y el líquido de baño cuando la camisa se desliza en el interior de la cámara de ensayos.

## 2.7. MOVIMIENTOS DEL DISCO INFERIOR, D2

Todos los subsistemas que provocan los movimientos del disco D2 se encuentran, a excepción de los motores y los ejes de transmisión, en el hueco existente entre la pared inferior de la cámara de ensayos (la chapa de metacrilato P2) y la base del tanque (el cristal K6) siendo accesibles previo desmontaje del marco pentagonal PT. Este subsistema funciona pues sumergido en el

líquido del baño y se ha diseñado de forma que la zona sea visible a través del disco D2. Los movimientos a los que puede ser sometido dicho disco son: giro, vibración axial y desplazamiento lateral.

### 2.7.1. Rotación

El disco D2, Fig. 16, va pegado a su portadiscos F2 de diámetro levemente inferior al del anillo de adaptación, A2. El portadiscos se rosca sobre una rueda dentada que está dividida en dos partes, R2A y R2B, que pueden deslizar axialmente una sobre otra; la rueda dentada está situada entre tres engranajes de centraje GC montados sobre rodamientos, Fig. 17, comunicándose el movimiento de giro al conjunto disco-portadiscos-rueda dentada a través de uno de estos engranajes GC mediante un piñón G5 conectado con el motor M2 a través de un eje dividido en dos partes, la inferior de las cuales, E2A, discurre por un taladro practicado en el taco de metacrilato T2 hasta la cara superior del tanque donde se une a la parte superior del eje, E2B (la unión entre las dos partes del eje no es fija, de forma que pueda desmontarse el tanque del resto del PTF) que a su vez continúa, atravesando la chapa P6, hasta la chapa P7 donde, mediante tres engranajes, G6, G7 y G8 (análogos a los utilizados para la unión del motor M1 con el eje de giro del disco D1) se conecta al motor M2 (véase la Fig. 18).

Como ya se ha dicho, la rueda dentada tiene dos partes: una, denominada R2B, en contacto con los engranajes de centraje GC y la otra, R2A, sobre la que se enrosca el conjunto disco-portadiscos (que es desmontable al igual que ocurre en el disco D1).

La parte R2A puede deslizar axialmente sobre el interior de la parte dentada R2B (Figs. 16 y 17) que al girar transmite el movimiento a la primera, y por tanto al disco D2, gracias a unas chavetas cilíndricas CH que permiten el deslizamiento pero no el giro relativo entre R2A y R2B.

El conjunto piñón G5, ruedas de centraje, GC y RD, y parte dentada de la rueda, R2B, se encuentra embutido entre dos chapas de metacrilato de 5 mm de espesor, S1 y S3, separadas por otra distanciadora de 8 mm de espesor, S2, provistas cada una de los taladros y vaciados convenientes. Las tres chapas conforman un sandwich cuya rigidez se consigue por medio de los ejes de las ruedas de centraje que acaban roscados y se atuercan. El sandwich está apoyado sobre el marco PT y su posición queda fijada por el eje E2A y por uno de sus lados que hace tope con la cara lateral del marco PT correspondiente a dicha parte del tanque. En la cara lateral opuesta hay un muelle, MU, que hace que esta posición se mantenga durante el tiempo deseado.

La parte deslizante de la rueda, R2A, posee una ranura en su periferia en la que entran dos pestañas pertenecientes a la armadura de vibración AM, cuya función se explica en el apartado siguiente.

### 2.7.2. Vibración

La armadura de vibración AM está conectada al vibrador VB mediante una varilla que, por los mismos motivos que el eje para el giro del disco D2, se encuentra dividida en dos partes: la inferior V1A que pasa a través de un taladro existente en el taco de metacrilato T1 (Figs. 18 y 19) y la superior, unida di-

rectamente al vibrador VB. La armadura AM está por uno de sus ex tremos atornillada, dejando un cierto juego, a la chapa superior, S3, del sandwich y por el otro unida a la parte inferior de la varilla V1A; las dos pestañas de la armadura entran en la ranura existente en la rueda R2A de manera que el conjunto R2A-F2-D2 que da sujeto axialmente por dichas pestañas deslizando sobre las mis mas al girar.

Cuando el vibrador se pone en funcionamiento la varilla transmite un movimiento de vaivén a la armadura AM (recuérdese que un extremo está fijado a la chapa S3) que a su vez comunica un movimiento de vibración axial a la parte deslizante de la rue da, R2A, al portadiscos F2 y al disco D2. Cuando la vibración ce sa, el disco vuelve a su posición inicial gracias a un par de len güetas, LG, que actúan como resortes, atornilladas a la chapa S3 y que también entran en la ranura (Fig. 20).

Para hacer posible el movimiento de la armadura, las uniones de ésta, tanto con el sandwich como con la varilla, se han hecho intercalando arandelas de goma que proveen el juego ne cesario. En la Fig. 21 se muestran detalles de la unión de la ar madura AM con la parte inferior de la varilla V1A y de ésta con la parte superior V1B, así como de la unión de las dos partes del eje para el giro del disco D2 (E2A y E2B).

### 2.7.3. Desplazamiento lateral

El desplazamiento lateral del disco D2 se consigue haciendo girar todo el sandwich alrededor del eje E2A mediante un tornillo de latón, TD, roscado al tanque, Fig. 22. Dicho tornillo al avanzar empuja la parte del sandwich que hace tope con el tan

que y cuando retrocede, el muelle MU obliga al sandwich a volver a su posición inicial.

## 2.8. MODO DE OPERACION CON EL PTF

### 2.8.1. Llenado y vaciado del tanque

El llenado del tanque con el líquido de baño se efectúa manualmente vertiendo el líquido en el interior a través del rebosadero RB (Fig. 5). El tanque se llena hasta un cierto nivel de forma que después, al formar la zona, el líquido de baño no sobrepase el techo, P3, del tanque; durante esta segunda fase el aire atrapado en la cámara puede escapar libremente a través del rebosadero conforme sube el nivel.

Una vez acabada la experimentación, después de recogido el líquido de trabajo, el tanque se vacía por gravedad a través del orificio practicado en la base del tanque (en el cristal K6). Para facilitar el vaciado, el orificio de salida está situado debajo de un taladro que atraviesa el sandwich formado por las chapas S1, S2 y S3 que a su vez está encarado con otro taladro realizado en el suelo de la cámara de ensayos (en la chapa de metacrilato P2).

### 2.8.2. Inyección y formación de la zona líquida

Con el tanque lleno del líquido de baño hasta el nivel prefijado, se acciona el motor M3 de forma que descienda la camisa CA hasta que los discos D1 y D2 entran en contacto (al bajar o subir el disco D1 el líquido de baño puede entrar o salir en la camisa a través de los orificios realizados en la misma, Fig. 11) y a continuación se inicia la inyección al mismo tiempo que

se separan los discos subiendo la camisa CA.

El orificio de inyección, un taladro efectuado en el centro del disco D1, tiene un diámetro de 6 mm pero se pueden colocar boquillas de forma que el diámetro sea menor.

En la actualidad la inyección se realiza manualmente por medio del sistema de jeringa representado en la Fig. 23. Al girar el eje roscado E3 mediante la manivela MV éste asciende arrastrando al émbolo EB que succiona el líquido de un recipiente. Una vez lleno el cilindro CL, se cambia el paso de la válvula VL y se gira la manivela en sentido contrario bajando el pistón que impulsa al líquido a través de un tubo flexible hacia el conducto de inyección CI. Para evitar que el líquido de trabajo pueda fugarse por las uniones entre el conducto de inyección y la rueda dentada R1 o entre ésta y el portadiscos F1 (Fig. 13), estas uniones están selladas mediante juntas tóricas.

Para un futuro está previsto que la inyección se realice automáticamente y para tal fin se ha reservado un compartimento en la peana, C8, que alojará al sistema de inyección.

### 2.8.3. Limpieza del tanque y de los discos

Primeramente se debe desmontar el tanque del resto del PTF para lo cual, una vez desunidos las dos partes del eje que manda el giro del disco D2 y de la varilla de vibración, desatornillados los tacos T1 y T2 y retirados los apoyos móviles (conviene que sea en este orden) se baja el tanque (se deshace la ligadura establecida por los posicionadores PS con el equipo motor) hasta que salga el rebosadero y quede liberada la camisa, que deberá encontrarse en su posición más alta.

La limpieza se hace manualmente tratando los discos y las partes manchadas con disolventes adecuados. El disco D1 es accesible directamente al desmontar el tanque, y al D2 y a los cristales K1 a K5 se llega a través del vaciado hecho en las chapas P1 y P3 para el paso de la camisa (Fig. 5). Si la base del tanque, K6, se hubiera manchado, su limpieza, al igual que la de los mecanismos para los movimientos del disco D2, se realiza desmontando el marco PT.

#### 2.8.4. Iluminación y registro de imágenes

El PTF no lleva incorporado equipo alguno de iluminación ni de registro de imagen. La iluminación, sea de fondo, o en planos meridianos, o paralelos a los discos, se realizará utilizando un proyector de diapositivas comercial o bien, si las necesidades de iluminación fueran aún mayores, con un foco de alta potencia (SYLVANIA Cariblean, Spor-Flood Light, 500 W, 220 V) disponible en el Lamf.

Para el registro de imágenes se pueden utilizar cualquier tipo de cámaras (fotográficas, tomavistas, vídeo), pudiéndose filmar a través de cualquiera de las paredes laterales del tanque (cristales K1 a K5) y a través del disco D2 y de la base del tanque K6. Para este último modo, si el equipo de filmación no es demasiado voluminoso, la cámara se puede colocar debajo del tanque mismo aunque, para facilitar el enfoque y el manejo del equipo fotográfico, el modo normal de operación será colocando la cámara axial fuera del PTF y filmando con esta cámara con ayuda del espejo EJ, Fig. 24, que se mantiene en posición con la ayuda de la tapadera C7 del cajón donde se guarda dicho espejo.

### 2.8.5. Control de los movimientos

Todo el control del PTF, excepto el desplazamiento lateral del disco D2 y la inyección (que en la versión actual se accionan manualmente) se realiza desde el panel de mandos, PM, situado en el frontal de la peana PN (Fig. 3).

Dicho panel, tal como se muestra en la Fig. 25, aloja los interruptores de accionamiento/parada de los motores M1, M2 y M3 y del vibrador VB. Los interruptores de los motores tienen tres posiciones: parada, giro en un sentido y giro en el sentido contrario; mientras que el del vibrador sólo tiene dos posiciones (marcha/parada) controlándose la frecuencia y la amplitud de vibración mediante un equipo externo oscilador/amplificador, marca LING, complementario del vibrador empleado, cuyo panel de mandos se muestra también en la Fig. 25.

El desplazamiento axial del disco D1 se controla manualmente por medio de un cursor móvil adosado a la camisa CA que desliza sobre una regleta graduada. Puesto que el paso de los husillos es de 1 mm y la velocidad de giro del motor M3 es de 60 rpm  $\pm 2.5\%$ , el desplazamiento axial del disco D1 se realiza actualmente con una velocidad de  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\pm 2.5\%$ ).

Respecto a las velocidades de rotación de los discos D1 y D2, el equipo motor actual no permite una variación continua de los mismos, ya que los motores carecen de reguladores de velocidad, pudiendo funcionar en un sentido de giro o en otro, pero a la velocidad de rotación nominal. Para conseguir diversas velocidades de giro de los discos, aunque el paso de unas a otras se tenga que hacer parando los motores, se dispone de varios juegos de engranajes, G2, G3 y G4 para el disco D1, G6, G7 y G8 para el

D2 (véanse las Figs. 15 y 18) cuyas características, al igual que las velocidades de giro alcanzables, se muestran en las Tablas 6 y 7.

En cuanto al equipo de vibración del disco D2, el vibrador utilizado permite usar frecuencias desde 1.5 Hz a 25 kHz (con error inferior al 5%) divididas en cuatro rangos, el menor de los cuales incluye el margen de frecuencias de interés en nuestra experimentación: de 1.5 Hz a 2 Hz, con incrementos de hasta 0.1 Hz. La amplitud máxima de vibración es de 1.25 mm en el vibrador que se traduce en una amplitud máxima de 0.7 mm en el disco D2.

## 2.9. LIMITACIONES PREVISTAS DEL EQUIPO

El PTF, con el que ya se ha iniciado la etapa de verificación y comprobación de las prestaciones esperadas, fue diseñado con el ánimo de disponer de un equipo sencillo, de bajo coste, pero lo más parecido posible al FPM. Este punto de vista introdujo una serie de penalizaciones en el diseño que, además de las que puedan aparecer durante los ensayos de verificación, está previsto ir subsanando en etapas posteriores. Estas limitaciones, y sus correspondientes soluciones, son las siguientes:

i) Inaccesibilidad de la cámara de ensayos. Una vez lleno el tanque con el líquido de baño y formada la zona, cualquier anomalía, como puede ser el desprendimiento de gotas de líquido de trabajo (que quedarían flotando en la cámara) es irreparable desde el exterior. Este problema se solucionaría colocando unas varillas auxiliares accionables desde el exterior como se muestra en la Fig. 26. Sobre taladros practicados en dos de los cristales laterales se colocaría una junta estanca de goma flexi

ble que permitiese el paso de una varilla manipulable desde el exterior del tanque.

ii) Regulación de las velocidades de desplazamiento y giro. Con la configuración actual del PTF el desplazamiento axial del disco D1 se puede realizar a una única velocidad ( $1 \text{ mm.s}^{-1}$ ) y los discos sólo pueden girar a velocidades fijas prefijadas de antemano (aunque elegibles dentro de una amplia gama de valores). Está prevista la adición de dispositivos eléctricos para regular la velocidad de giro de los motores, de forma que el paso de unos valores a otros de las velocidades se pueda hacer de una manera continua sin necesidad de parar los motores.

iii) Control de los movimientos. Para mejorar el control de los diversos subsistemas del equipo motor se instalará en cada motor un sistema de control análogo al representado en la Fig. 27, adaptando a cada uno de los ejes un disco perforado y un contador óptico (célula fotoeléctrica) cuyas señales, mediante un microprocesador, se traducirán en valores numéricos que indiquen, entre otros, la posición axial del disco D1 y las velocidades de giro.

Aparte de estas limitaciones, como ya se dijo voluntariamente, es posible que se descubran otras conforme avance el programa de utilización del PTF (incompatibilidades entre los líquidos y algunos de los materiales utilizados, problemas de coaxialidad y paralelismo entre los discos, fugas de líquidos, tiempos de preparación y limpieza, etc.) dificultades que de aparecer, dado el carácter flexible del diseño, esperamos sean fácilmente subsanables.

TABLAS

Tabla 1

Relación de abreviaturas y acrónimos utilizados para la denominación de las diversas partes del PTF en el texto y en las figuras.

CODIGO	No. de piezas	MATERIAL	FIGS.	DESCRIPCION
A1	3	Metacrilato	11,12,13,15	Anillo de adaptación del disco superior D1
A2	3	Metacrilato	7,16,19	Anillo de adaptación del disco inferior D2
AM	1	Latón	16,18,19,20,21	Armadura romboidal para la vibración del disco D2
AP	3		2	Apoyos móviles del tanque, sujetos a las barras verticales de la estructura
C1	1	Madera	3	Cajones para el almacenamiento del utillaje auxiliar, situados en la parte frontal de la peana
C2	1			
C3	1			
C4	1			
C5	1			
C6	1			
C7	1	Madera	3,24	Cajón para el alojamiento y soporte del espejo
C8	1	Madera	3	Cajón para el alojamiento del equipo de inyección
CA	1	PVC	10,11,12,13,15,16,19,24	Camisa cilíndrica, soporte del disco D1
CD	1	Varios	10	Conjunto cadena-piñones para la transmisión de movimiento de uno a otro husillo en el mecanismo de desplazamiento vertical del disco D1
CH	3	Latón	16,17	Chavetas para la transmisión del giro entre las dos partes, R2A y R2B, de la rueda dentada inferior
CI	1	Latón	12,13	Conducto de inyección
CL	1	PVC	23	Cilindro del sistema de inyección
CM	1	Madera	9	Carena del equipo motor
D1	3	Vidrio	13,15,16,19	Disco superior o de inyección
D2	3	Vidrio	16,18,19	Disco inferior, opuesto al de inyección

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 1 (Continuación)

Relación de abreviaturas y acrónimos utilizados para la denominación de las diversas partes del PTF en el texto y en las figuras.

CODIGO	No. de piezas	MATERIAL	FIGS.	DESCRIPCION
DA	1	Metacrilato	13,14	Base superior de la camisa CA, actúa como posicionador del eje E1A y del conducto de inyección
DM	1	Metacrilato	13	Disco intermedio de la camisa CA, actúa como posicionador del eje E1A y del conducto de inyección
DS	4	Latón	8	Distanciadores de la estructura del equipo motor
E1A	1	Latón	12,13,14, 15	Parte inferior del eje para la transmisión del movimiento de giro al disco D1
E1B	1	Varios	14,15	Parte superior, telescópica, del eje para la transmisión del movimiento de giro al disco D1
E2A	1	Latón	16,18, 21, 22	Parte inferior del eje del mecanismo de giro del disco D2
E2B	1	Latón	17,18,21	Parte superior del eje del mecanismo de giro del disco D2
E3	1	Latón	23	Eje roscado del sistema de inyección
EB	1	Metacrilato	23	Embolo del sistema de inyección
EJ	1	Vidrio	24	Espejo auxiliar para la filmación según el eje de la zona
EM	1	Varios	1	Equipo motor del PTF
ES	1	Hierro	1	Estructura del PTF
ET	1	Latón	4,5,6	Estructura metálica del tanque
F1	3	Metacrilato	12,13,15	Portadiscos del disco D1
F2	3	Metacrilato	16,18,19, 20	Portadiscos del disco D2
G1	1	Metacrilato	12,13,15	Engranaje inferior del sistema de giro del disco D1
G2 G3 G4	9	Metacrilato	15	Engranajes para fijar la velocidad de giro del disco D1

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 1 (Continuación)

Relación de abreviaturas y acrónimos utilizados para la denominación de las diversas partes del PTF en el texto y en las figuras.

CODIGO	No. de piezas	MATERIAL	FIGS.	DESCRIPCION
G5	1	Metacrilato	16,17,18	Engranaje inferior del sistema de giro del disco D2
G6	9	Metacrilato	18	Engranajes para fijar la velocidad de giro del disco D2
G7				
G8				
GC	3	Metacrilato	16,17,18	Engranajes posicionadores del mecanismo de giro del disco D2
HS	2	Latón	10	Husillos para el desplazamiento axial de la camisa CA y por tanto del disco D1
JG	2	Caucho	10	Juntas-guía de la camisa CA
K1	1	Vidrio	5,6	Caras laterales de la cámara de ensayos
K2	1			
K3	1			
K4	1			
K5	1			
K6	1	Vidrio	7	Cara inferior (base) del tanque
LG	2	Latón	20	Resortes para el posicionamiento axial del disco D2
M1	1	Varios	15	Motor para el giro del disco D1
M2	1	Varios	8,18	Motor para el giro del disco D2
M3	1	Varios	8,10	Motor para el desplazamiento axial del disco D1
MC	6	Latón	5,6	Marcos de los cristales de las caras laterales e inferior del tanque
MU	1	Acero	17,22	Muelle para el posicionamiento lateral del disco D2
MV	1	Metacrilato	23	Manivela del sistema de inyección
P1	1	Metacrilato	5,7,16	Cara superior (techo) de la cámara de ensayos
P2	1	Metacrilato	7,16,19	Cara inferior (suelo) de la cámara de ensayos

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 1 (Continuación)

Relación de abreviaturas y acrónimos utilizados para la denominación de las diversas partes del PTF en el texto y en las figuras.

CODIGO	No. de piezas	MATERIAL	FIGS.	DESCRIPCION
P3	1	Metacrilato	5,7,10,16,19	Cara superior del tanque
P4	1	Metacrilato	8,10,15	Chapa inferior de la estructura del equipo motor
P5	1	Aluminio	8,10,15	Chapas horizontales de la estructura del equipo motor
P6	1	Aluminio	8,10,15,18	
P7	1	Aluminio	8,15,18	
PM	1	Varios	1,25	Panel de mandos del PTF
PN	1	Madera	1,24	Peana (base) del PTF
PS	2	Acero	5,7	Posicionadores para la unión del tanque al equipo motor
PT	1	Latón	4,17	Marco donde se alojan los mecanismos para los movimientos del disco D2
Q1	1	Hierro	2	Cuadernas de la estructura del PTF
Q2	1			
Q3	1			
R1	1	Metacrilato	12,13,15	Rueda soporte del portadiscos F1
R2A	1	Metacrilato	16,17,18,19,20	Parte deslizante de la rueda soporte del portadiscos F2
R2B	1	Metacrilato	16,17,18,19	Parte dentada de la rueda soporte del portadiscos F2
RB	1	Latón	5	Rebosadero, conducto para el llenado del tanque
RD	12	Acero	13	Rodamientos a bolas (en total hay 12 instalados en el PTF)
S1	1	Metacrilato	16,19	Chapas que conforman las paredes y el distanciador del sandwich que aloja al sistema de giro del disco D2
S2	1	Metacrilato	16,17,19	
S3	1	Metacrilato	16,19,20	
T1	1	Metacrilato	4,5,19	Partes estructurales del tanque que simulan los salientes del sistema de limpieza de la cámara de ensayos
T2	1	Metacrilato	4,5,7,16	

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 1 (Continuación)

Relación de abreviaturas y acrónimos utilizados para la denominación de las diversas partes del PTF en el texto y en las figuras.

CODIGO	No. de piezas	MATERIAL	FIGS.	DESCRIPCION
TC	2	Teflón	10,11	Tuercas para la transmisión del movimiento de los husillos HS a la <u>ca</u> <u>mi</u> <u>sa</u> CA
TD	1	Latón	19,22	Tornillo para el desplazamiento lateral del disco D2
TM	1	Madera	9	Tapa de acceso a los engranajes para la selección de las velocidades de giro de los discos D1 y D2
TQ	1	Varios	1	Tanque para la formación de zonas líquidas flotantes mediante la técnica de Plateau
V1A	1	Latón	18,19,20, 21	Parte inferior de la varilla para la transmisión del movimiento de <u>vi</u> <u>br</u> <u>aci</u> <u>ón</u> al disco D2
V1B	1	Latón	18,21	Parte superior de la varilla para la transmisión del movimiento de <u>vi</u> <u>br</u> <u>aci</u> <u>ón</u> al disco D2
VB	1	Varios	8,18	Vibrador
VL	1	Varios	23	Válvula

Tabla 2

Relación de las figuras mencionadas en el texto

Fig.	CONTENIDO
1	Esquema general del Plateau Tank Facility (PTF).
2	Perspectiva de la estructura del PTF.
3	Perspectiva de la peana (base) del PTF.
4	Vista de la estructura del tanque, con los marcos para la sujeción de los cristales, y del marco pentagonal.
5	Perspectiva general del tanque.
6	Detalle de la unión de las paredes de cristal al tanque.
7	Corte en alzado del tanque.
8	Perspectiva del equipo motor, excluida la caja de protección y el sistema para el deslizamiento axial del disco D1.
9	Perspectiva de la carena de protección del equipo motor y de la tapa de acceso al compartimento que aloja los juegos de engranajes para la selección de las velocidades de giro de los discos.
10	Mecanismo para el desplazamiento axial del disco D1.
11	Vista de la camisa y del sistema de giro del disco D1.
12	Sección en planta de la camisa y del mecanismo de giro del disco D1
13	Sección en alzado de la camisa y del mecanismo de giro del disco D1.
14	Detalle del eje telescópico para la transmisión del giro al disco D1.
15	Esquema del sistema de giro del disco D1.
16	Sección en alzado del tanque. Mecanismo de giro y vibración del disco D2.
17	Sección en planta del tanque. Mecanismo de giro del disco D2.
18	Esquema de los sistemas de giro y vibración axial del disco D2.
19	Sección en alzado del tanque. Mecanismo de vibración axial del disco D2.
20	Sección en planta del tanque. Mecanismo de vibración axial del disco D2.
21	Detalle de las uniones de la varilla de vibración y del eje para el giro del disco D1.
22	Sección en planta del tanque. Mecanismo para el desplazamiento lateral del disco D1.
23	Esquema del sistema de inyección.
24	Modos de filmación, axial y lateral, en el PTF.
25	Paneles de mando del PTF, a, y del oscilador/amplificador del vibrador, b
26	Sistema para manipular en el interior del tanque.
27	Esquema de un sistema óptico de digitalización para el control de los movimientos de los discos.

Tabla 3

Características del PTF

A) ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

CONCEPTOS		COMENTARIOS	
Diámetro de los discos		60 mm	También se construirán discos de 40 y 100 mm de diámetro
Desplazamiento axial del disco D1		<130 mm	Está previsto dotar al sistema de interruptores de parada automáticos
Velocidad de desplazamiento		1 mm.s <sup>-1</sup>	
Velocidad de giro	disco D1	2.03 rpm	Para otras velocidades véase la Tabla 7
	disco D2	2.00 rpm	
Vibración del disco D2	frecuencia	>1.5 Hz	El mando del vibrador se hace desde un amplificador externo al PTF
	amplitud	<0.7 mm	
Desplazamiento lateral del disco D2		<2 mm	Manual
Inyección		Externa	Manual en la versión actual
Iluminación		Externa	
Registro de imagen		Externa	
Equipo motor		Véanse Tablas 4 y 5	Está previsto dotar a los motores de reguladores de velocidad

B) DIMENSIONES

	PEANA <sup>a</sup>	ESTRUCTURA	TANQUE <sup>b</sup>	EQUIPO MOTOR <sup>c</sup>	PTF <sup>a</sup>
Altura [m]	0.120	0.875	0.209	0.439	0.920
Anchura [m]	0.600	0.273	0.233	0.293	0.600
Profundidad [m]	0.400	0.243	0.187	0.263	0.400

<sup>a</sup> En la versión actual, sin el equipo de inyección incorporado y con el utillaje de filmación sin desplegar.

<sup>b</sup> La altura consignada es la del tanque desmontado como en las operaciones de limpieza, no se incluye pues la altura del sistema de deslizamiento axial del disco D1.

<sup>c</sup> Comprende motores, vibrador, estructura propia, cubierta de protección y el sistema de deslizamiento axial del disco D1.

Tabla 4

Características de los motores eléctricos incorporados al PTF [3].

MARCA		KELVIN		
Descripción		Motor asíncrono monofásico con dos sentidos de giro		
Denominación (en el PTF)		M1	M2	M3
Masa [Kg]		1.8		
Tensión de alimentación		220 V CA a 50 Hz		
Potencia absorbida		32 VA		
Par motor	[N.m]	0.74	0.37	0.31
	[kg.cm]	7.5	3.8	3.2
Velocidad en el eje <sup>a</sup> , ± 2.5%	[rad.s <sup>-1</sup> ]	2.51	5.24	6.28
	[rpm]	24	50	60

<sup>a</sup> Todos los motores van provistos de un reductor de la Serie 50000

Tabla 5

Características del vibrador LING, Modelo 101 [4].

Masa total	0.908 kg
Masa del sistema móvil	$6.5 \times 10^{-3}$ kg
Empuje máximo (a $10^3$ Hz)	8.9 N
Frecuencia máxima	$12 \times 10^3$ Hz
Desplazamiento máximo	$2.5 \times 10^{-3}$ m
Potencia absorbida	5-10 VA

Tabla 6

Características de los engranajes empleados en el PTF. En la versión actual, los engranajes construidos son de Metacrilato.

DENOMINACION	No. DE DIENTES	DIAMETRO EXTERIOR, <sup>a</sup> $D_e \times 10^3$ [m]	UNIDADES PRECISAS	UNIDADES CONSTRUIDAS
R1, rueda soporte del portadiscos F1	65	67	1	1
R2B, parte dentada de la rueda soporte del portadiscos F2	130	132	1	1
GC, engranajes posicionadores del mecanismo de giro del disco D2	26	28	3	3
G1, engranaje inferior del sistema de giro del disco D1	21	23	1	1
G5, engranaje inferior del sistema de giro del disco D2	21	23	1	1
G2,G3,G4,G6,G7 y G8, piñones reductores para fijar las velocidades de giro de los discos D1 y D2	18	20	1	0
	19	21	1	0
	21	23	2	2
	22	24	1	1
	23	25	2	0
	26	28	1	0
	27	29	1	0
	28	30	1	0
	31	33	1	0
	35	37	1	0
	39	41	1	0
	41	43	1	0
	47	49	1	0
	49	51	1	0
	84	86	1	1
85	87	1	1	

<sup>a</sup> El diámetro primitivo e interior se obtienen a partir del diámetro exterior restando a esta cantidad 2 mm y 4 mm respectivamente.

Tabla 7

Juegos de engranajes necesarios para conseguir las distintas velocidades de giro de los discos D1 y D2. Los engranajes se identifican en la Tabla por el número de dientes (véase la Tabla 6).

## DISCO SUPERIOR D1

VELOCIDAD DE GIRO		PIÑÓN UNIDO AL EJE, G6	PIÑÓN SATELITE, G7	PIÑÓN UNIDO AL MOTOR, G8
[rpm]	[rad.s <sup>-1</sup> ]			
2.03	0.21	22	-	84
3.46	0.36	21	19	47
4.35	0.46	23	21	41
5.98	0.63	27	22	35
6.87	0.72	31	20	35
9.10	0.95	27	28	23
10.45	1.09	31	26	23
14.40	1.51	39	23	21
18.09	1.89	49	18	21

## DISCO INFERIOR D2

VELOCIDAD DE GIRO		PIÑÓN UNIDO AL EJE, G2	PIÑÓN SATELITE, G3	PIÑÓN UNIDO AL MOTOR, G4
[rpm]	[rad.s <sup>-1</sup> ]			
2.00	0.21	21	-	85
3.46	0.36	21	18	49
4.35	0.46	21	23	39
5.99	0.63	23	26	31
6.88	0.72	23	28	27
9.12	0.96	35	20	31
10.47	1.10	35	22	27
14.40	1.51	41	21	23
18.08	1.89	47	19	21

FIGURAS

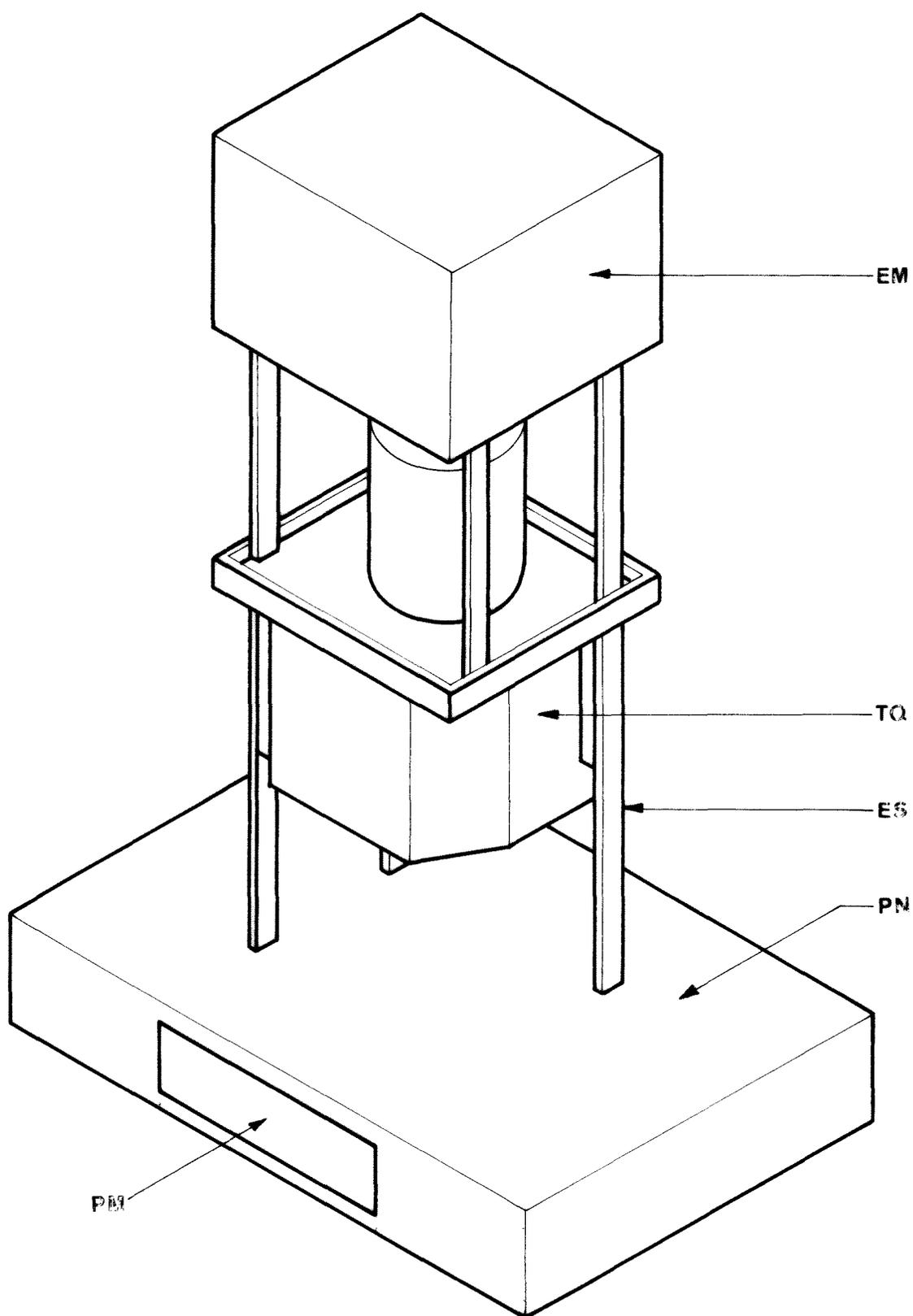


Fig. 1. Esquema general del Plateau Tank Facility (PTF).

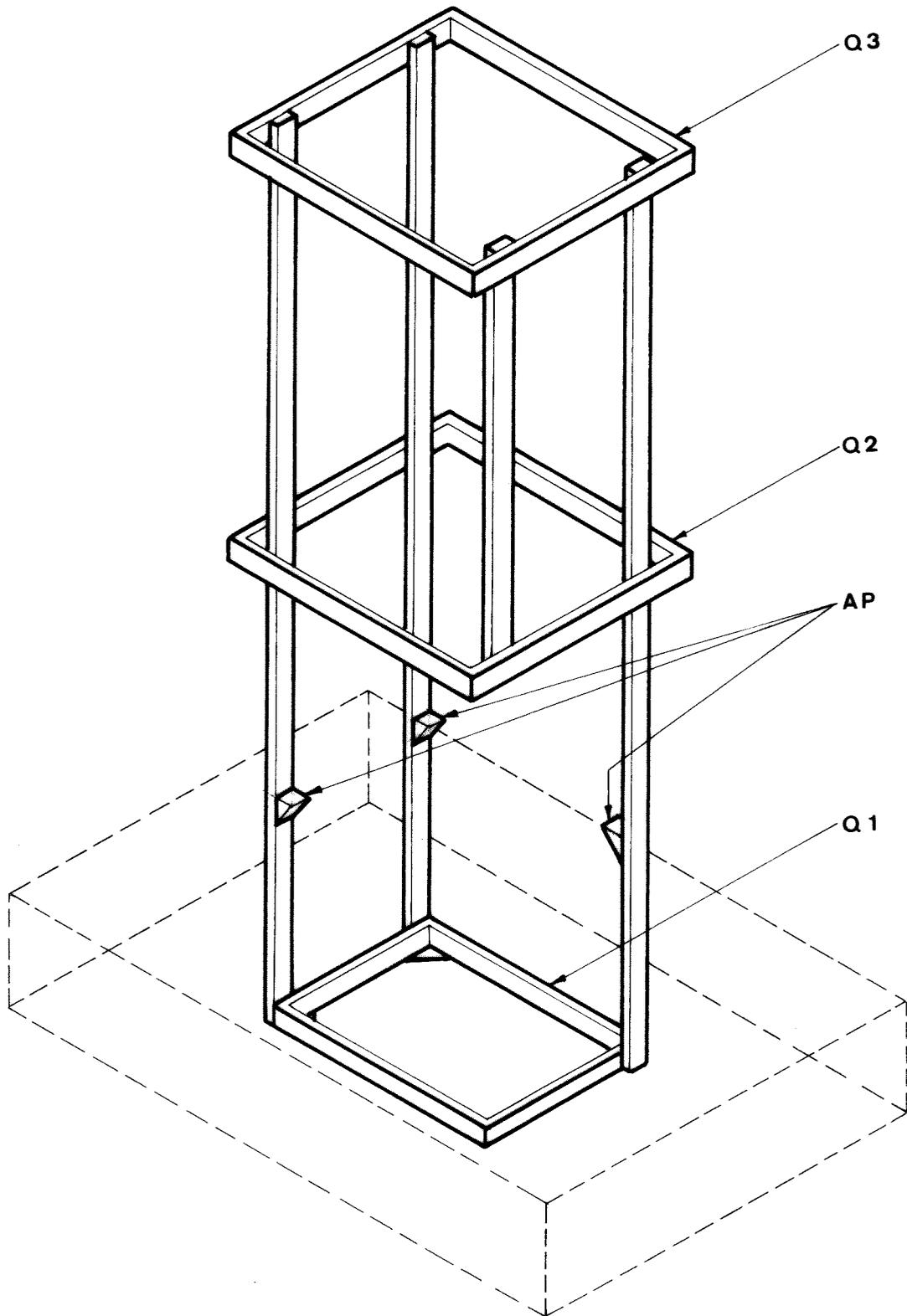


Fig. 2. Perspectiva de la estructura del PTF.

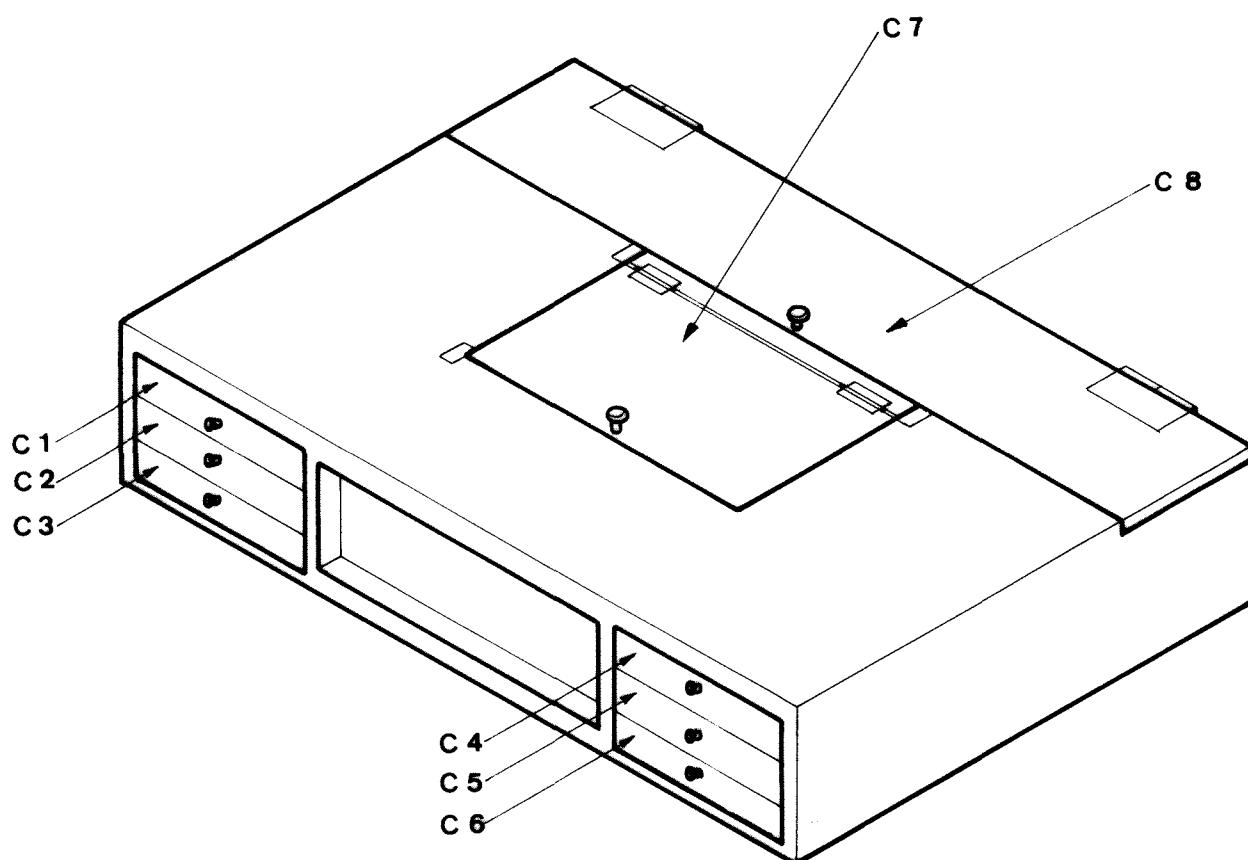


Fig. 3. Perspectiva de la peana (base) del PTF.

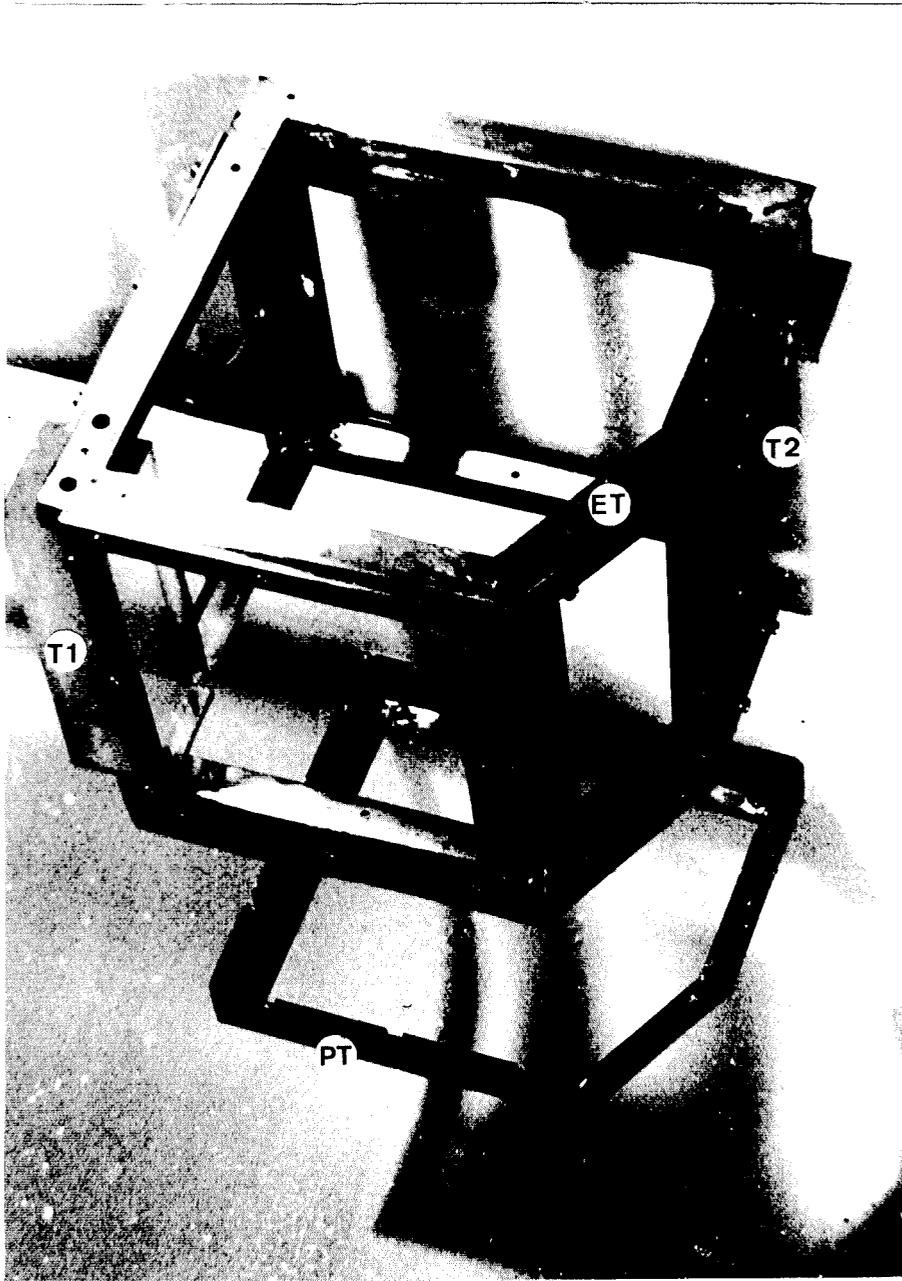


Fig. 4. Vista de la estructura del tanque, con los marcos para la sujeción de los cristales, y del marco pentagonal.

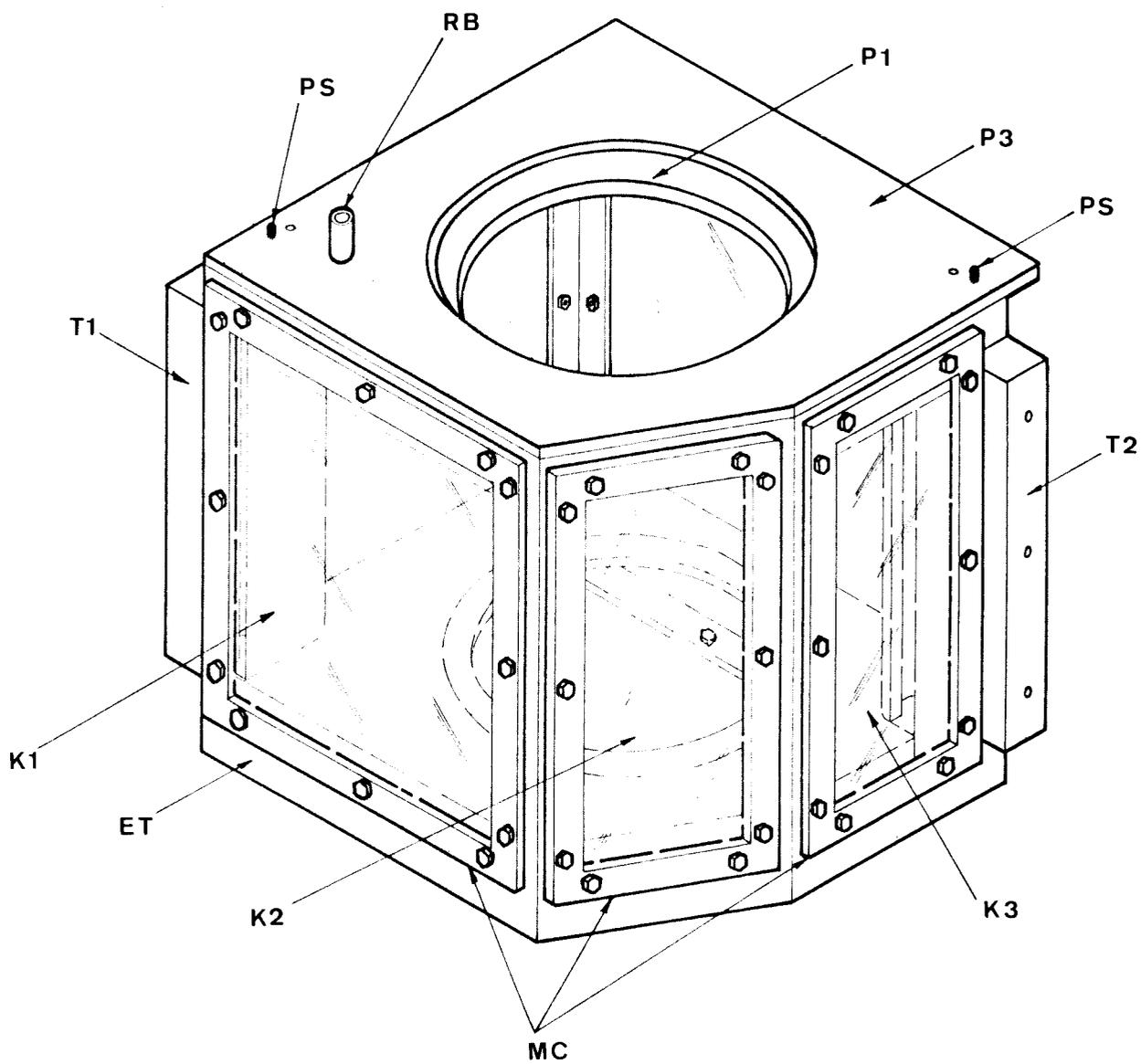


Fig. 5. Perspectiva general del tanque.

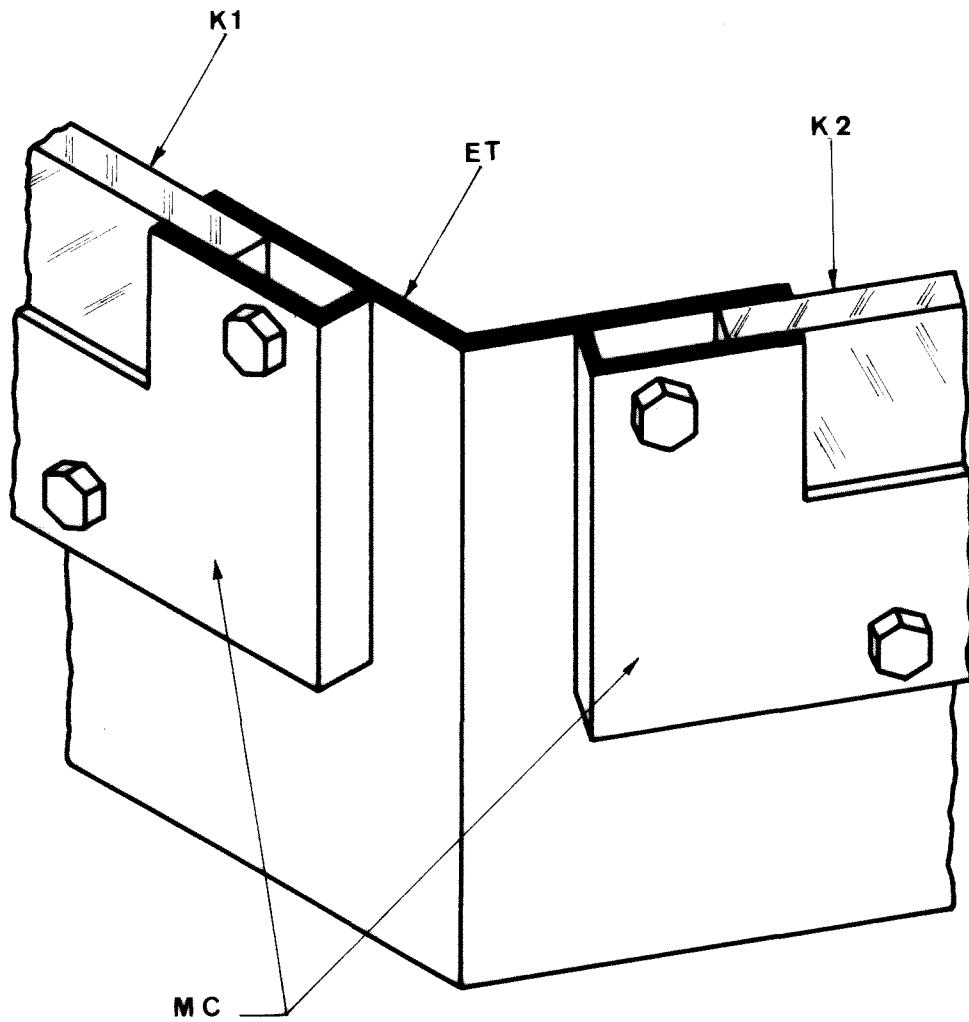


Fig. 6. Detalle de la unión de las paredes de cristal al tanque.

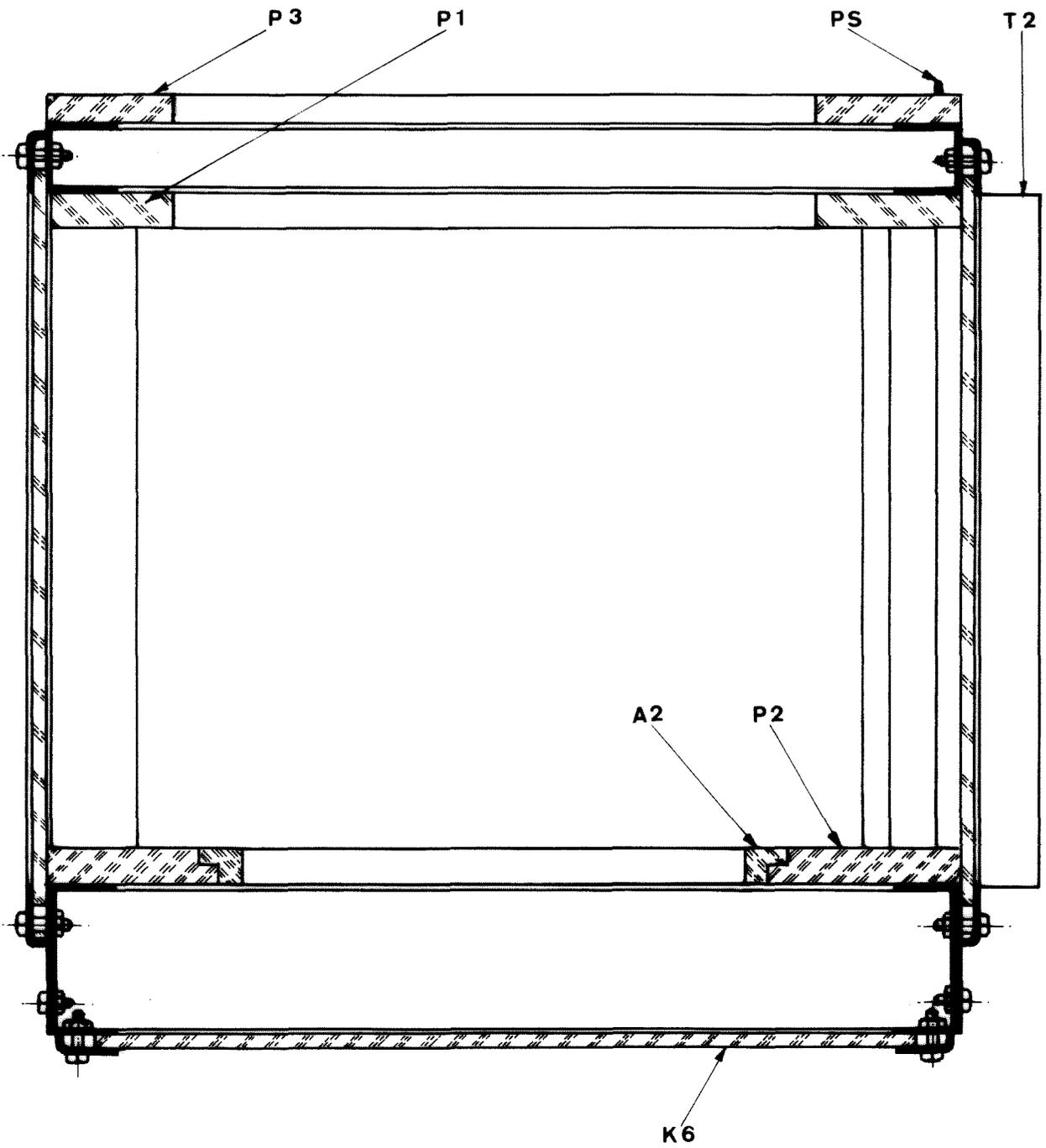


Fig. 7. Corte en alzado del tanque.

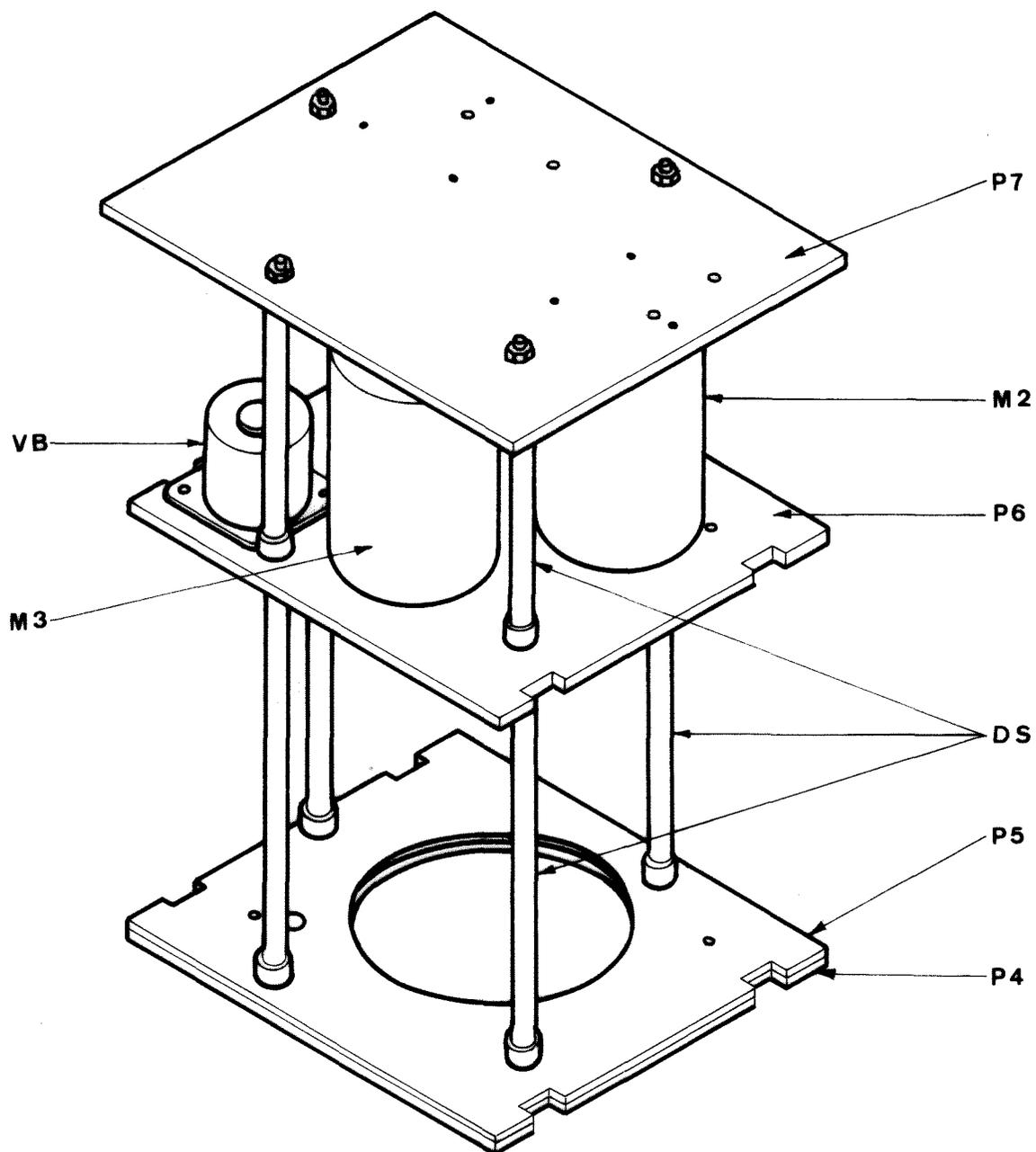


Fig. 8. Perspectiva del equipo motor, excluida la caja de protección y el sistema para el deslizamiento axial del disco D1.

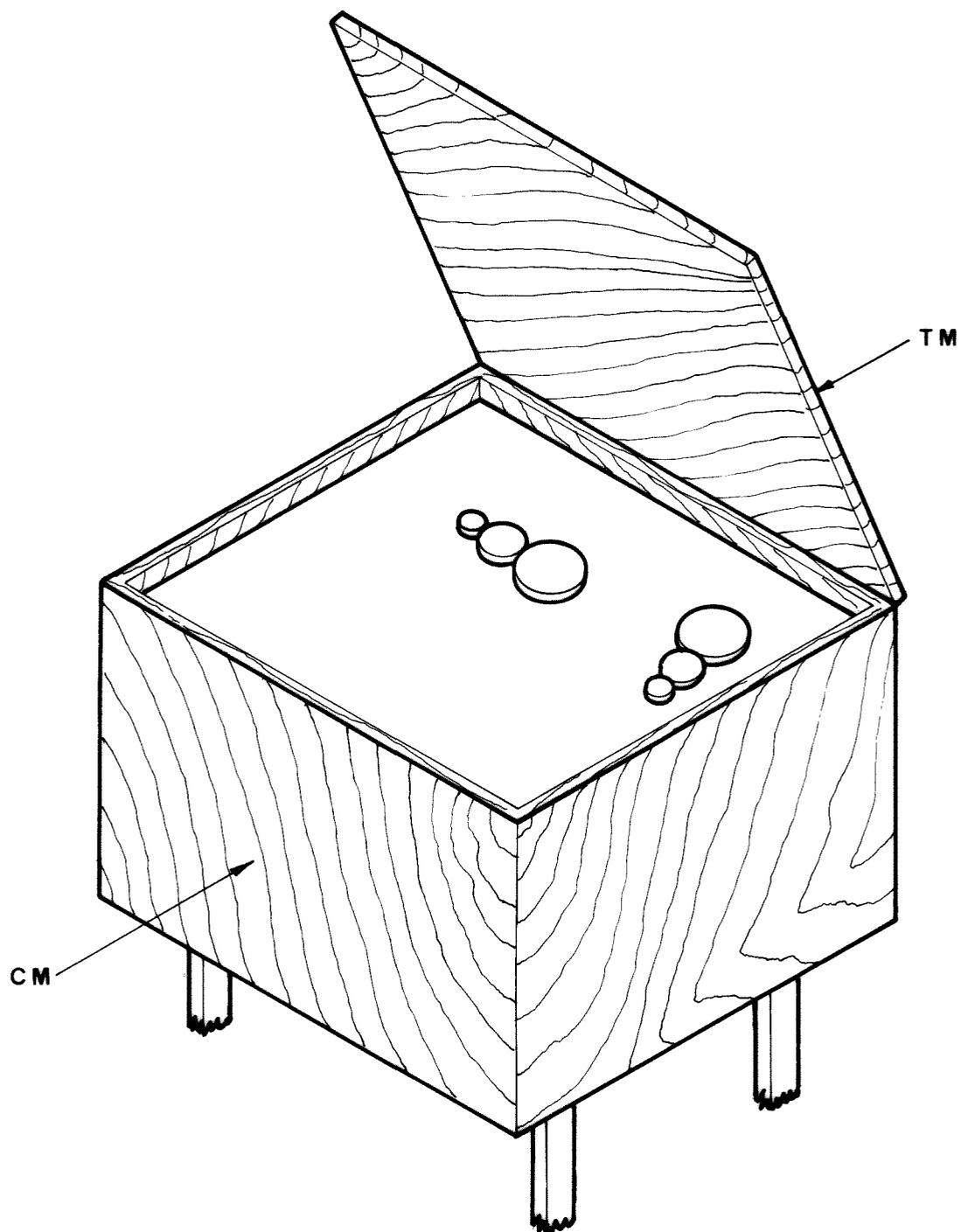


Fig. 9. Perspectiva de la carena de protección del equipo motor y de la tapa de acceso al compartimento que aloja los juegos de engranajes para la selección de las velocidades de giro de los discos.

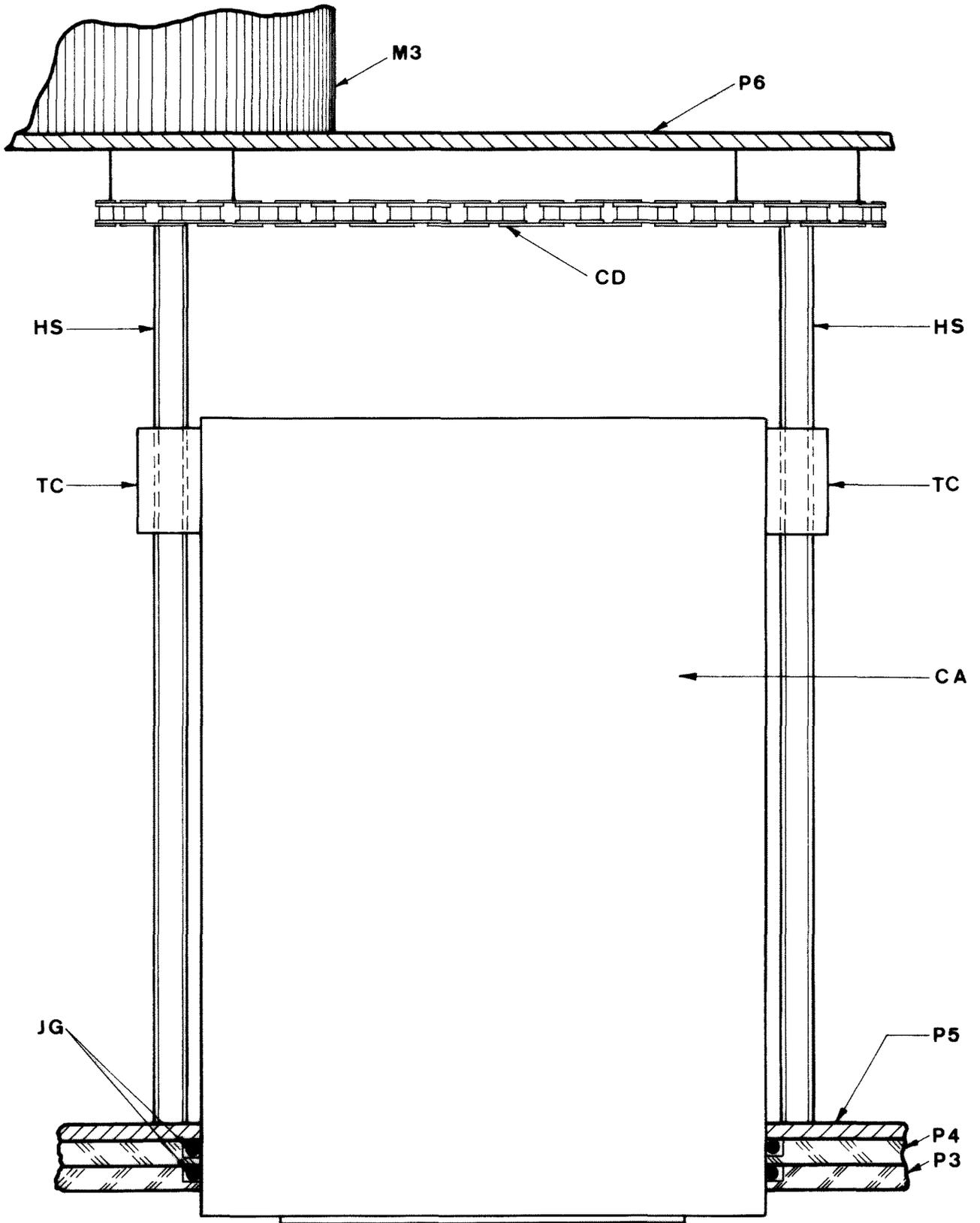


Fig. 10. Mecanismo para el desplazamiento axial del disco D1.

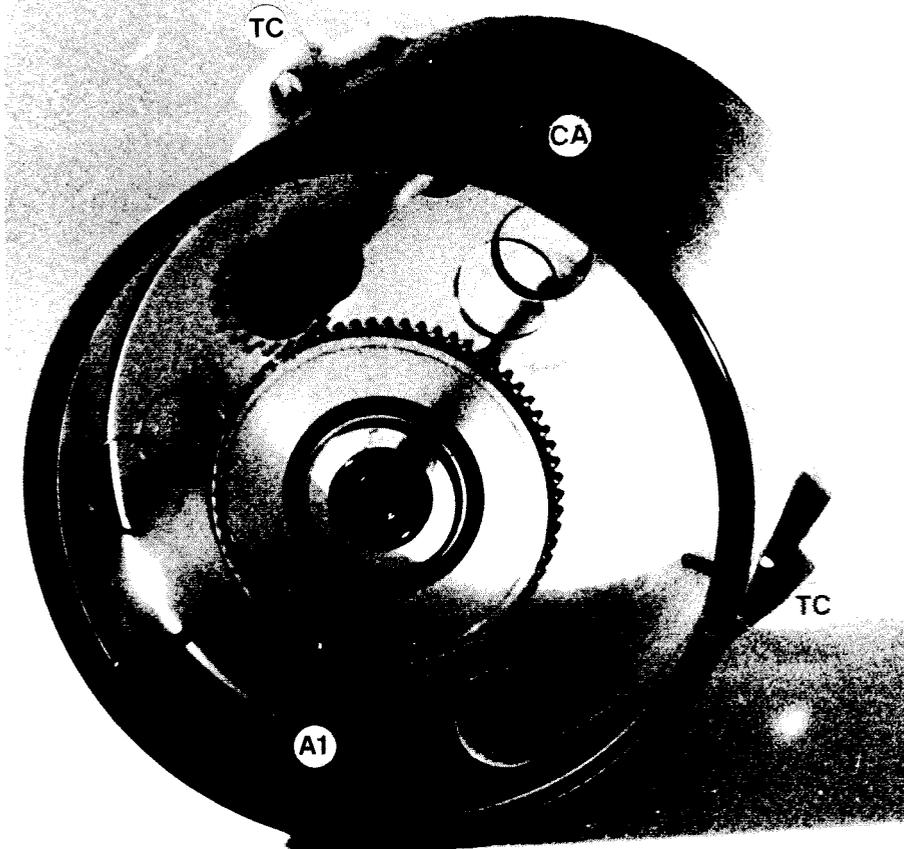


Fig. 11. Vista de la camisa y del sistema de giro del disco D1.

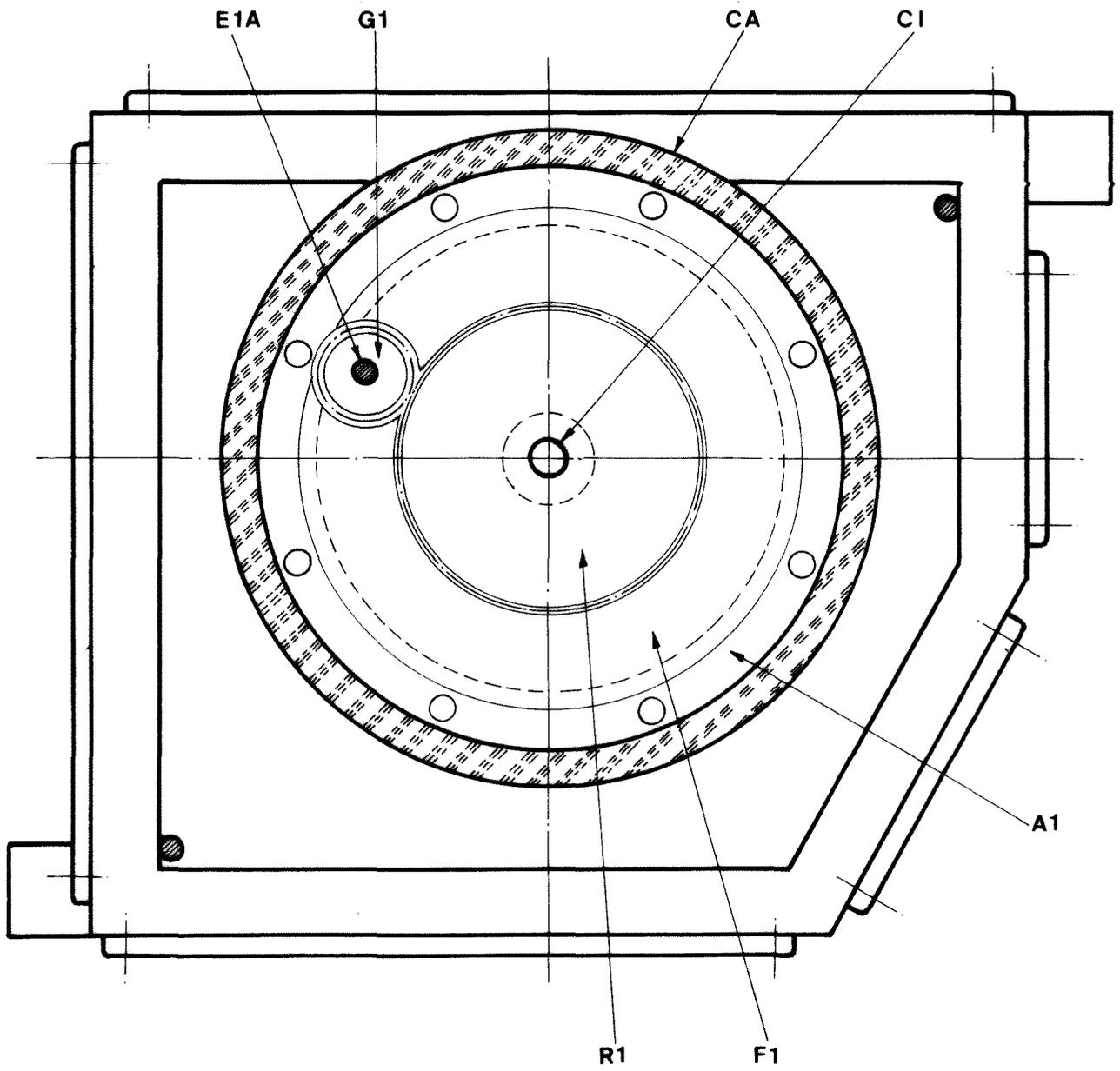


Fig. 12. Sección en planta de la camisa y del mecanismo de giro del disco D1.

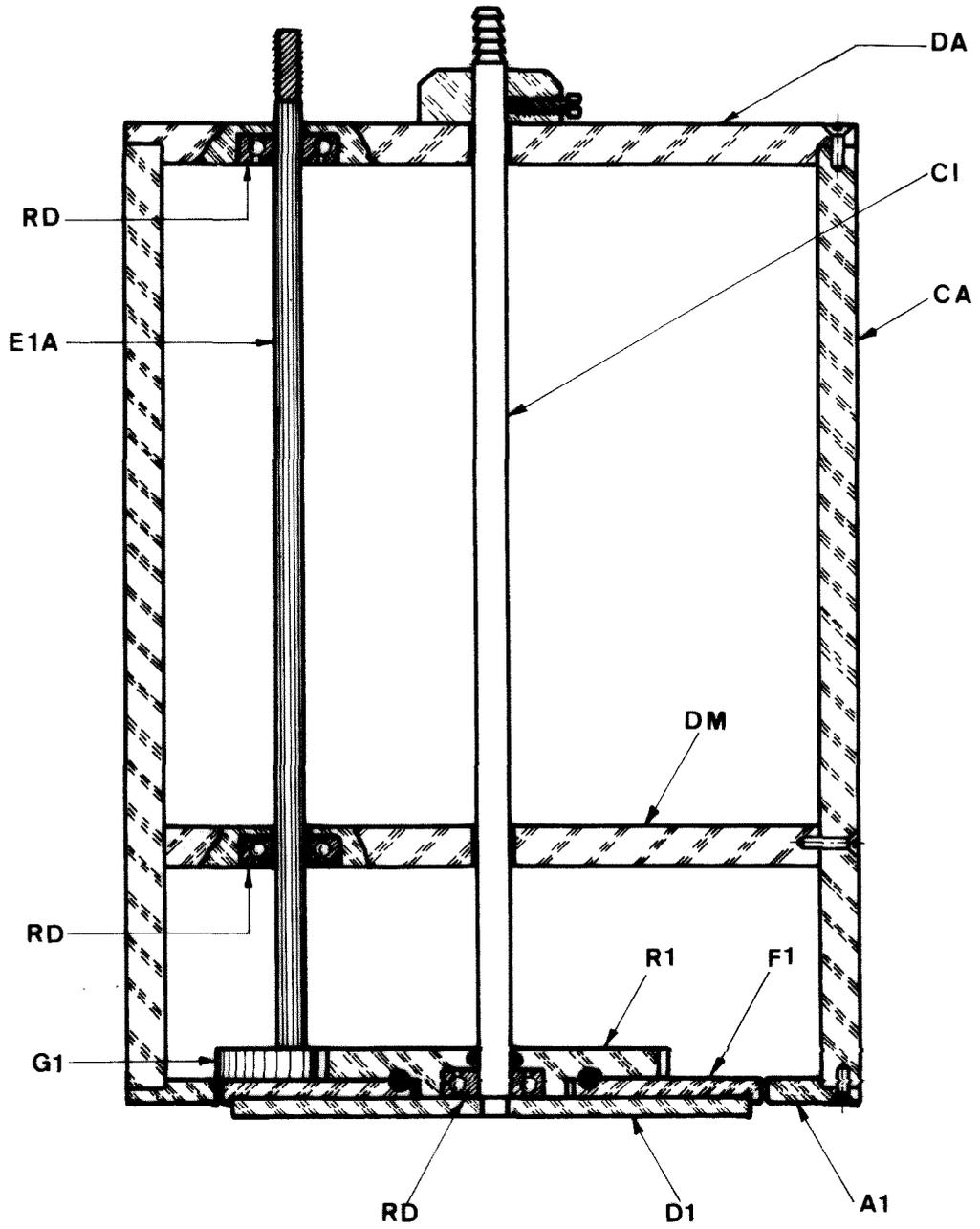


Fig. 13. Sección en alzado de la camisa y del mecanismo de giro del disco D1.

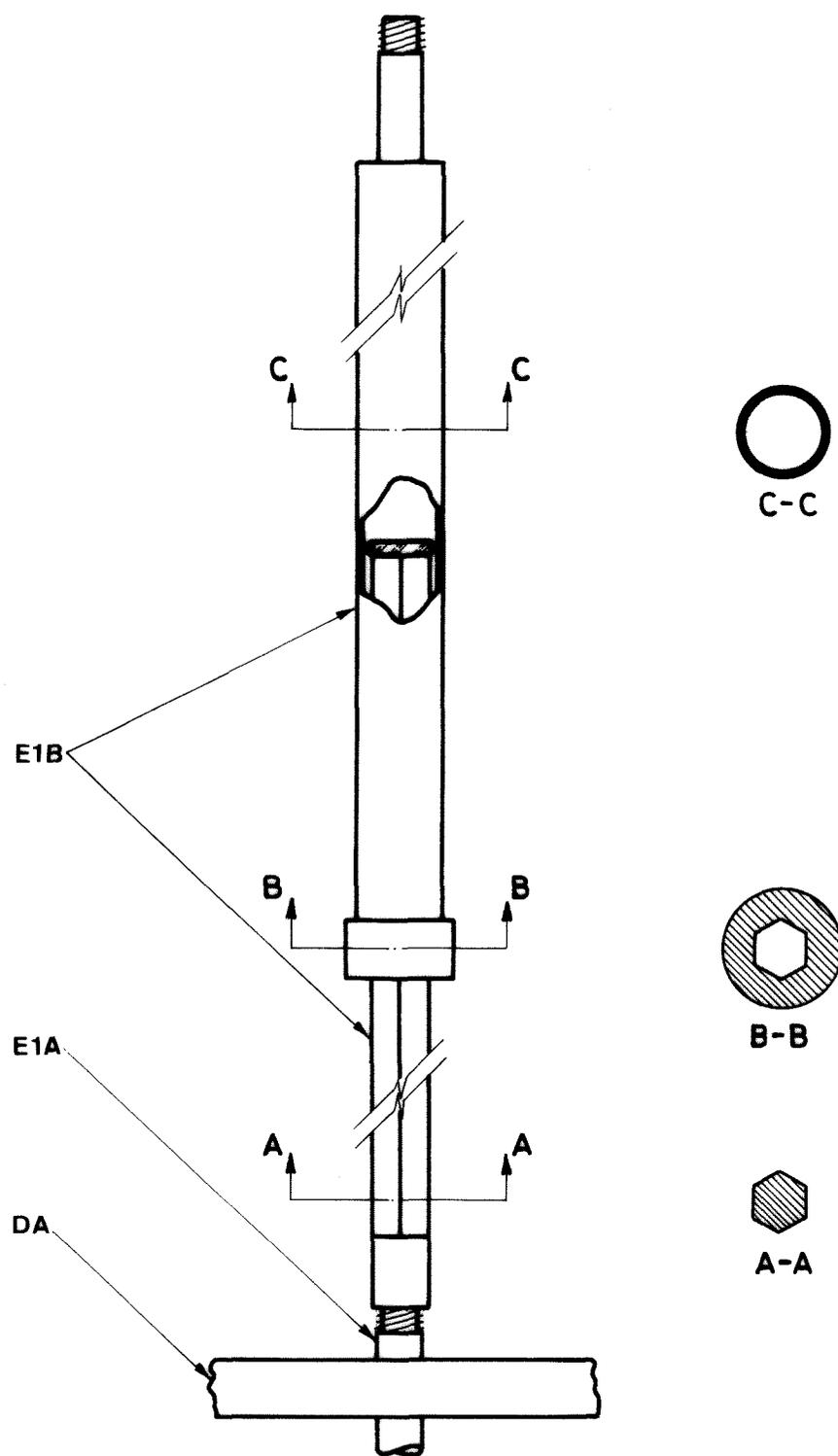


Fig. 14. Detalle del eje telescópico para la transmisión del giro al disco D1.

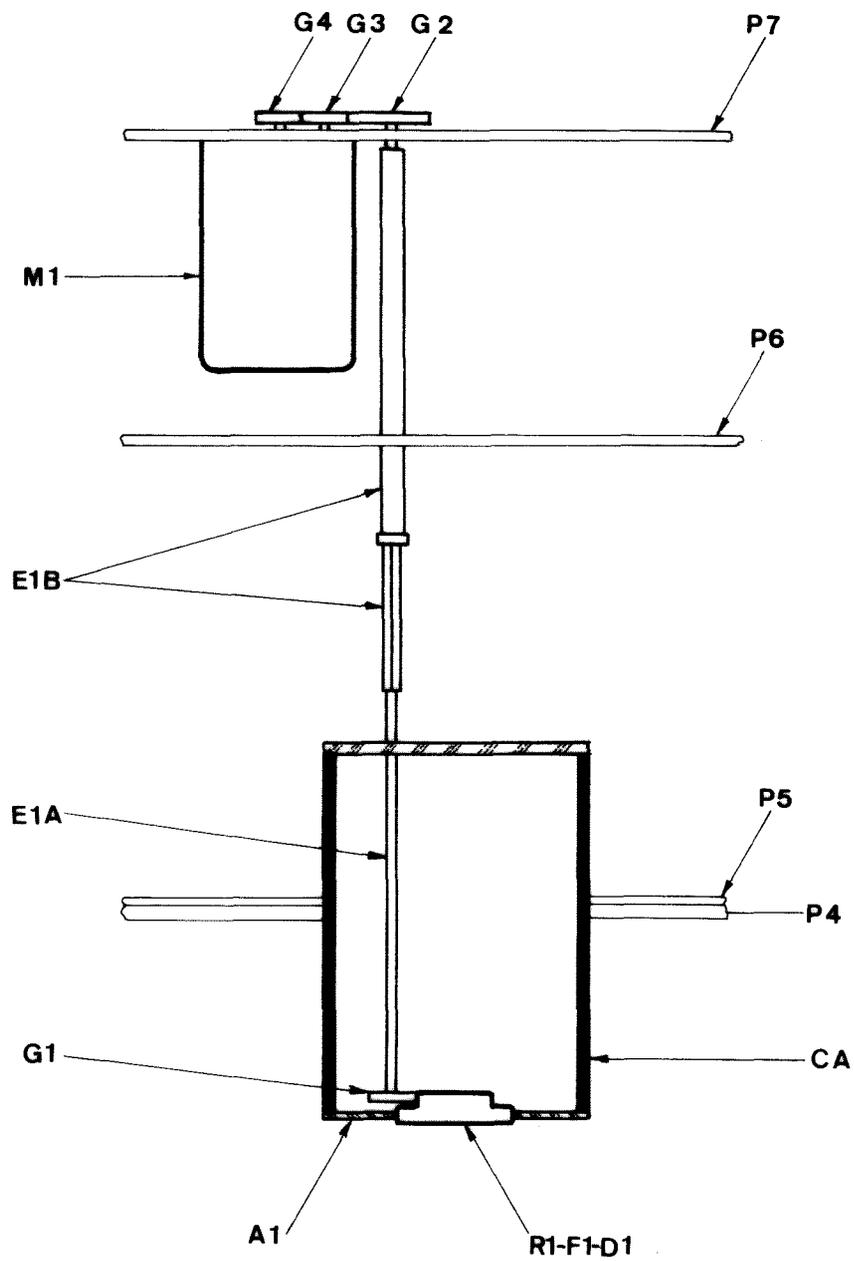


Fig. 15. Esquema del sistema de giro del disco D1.

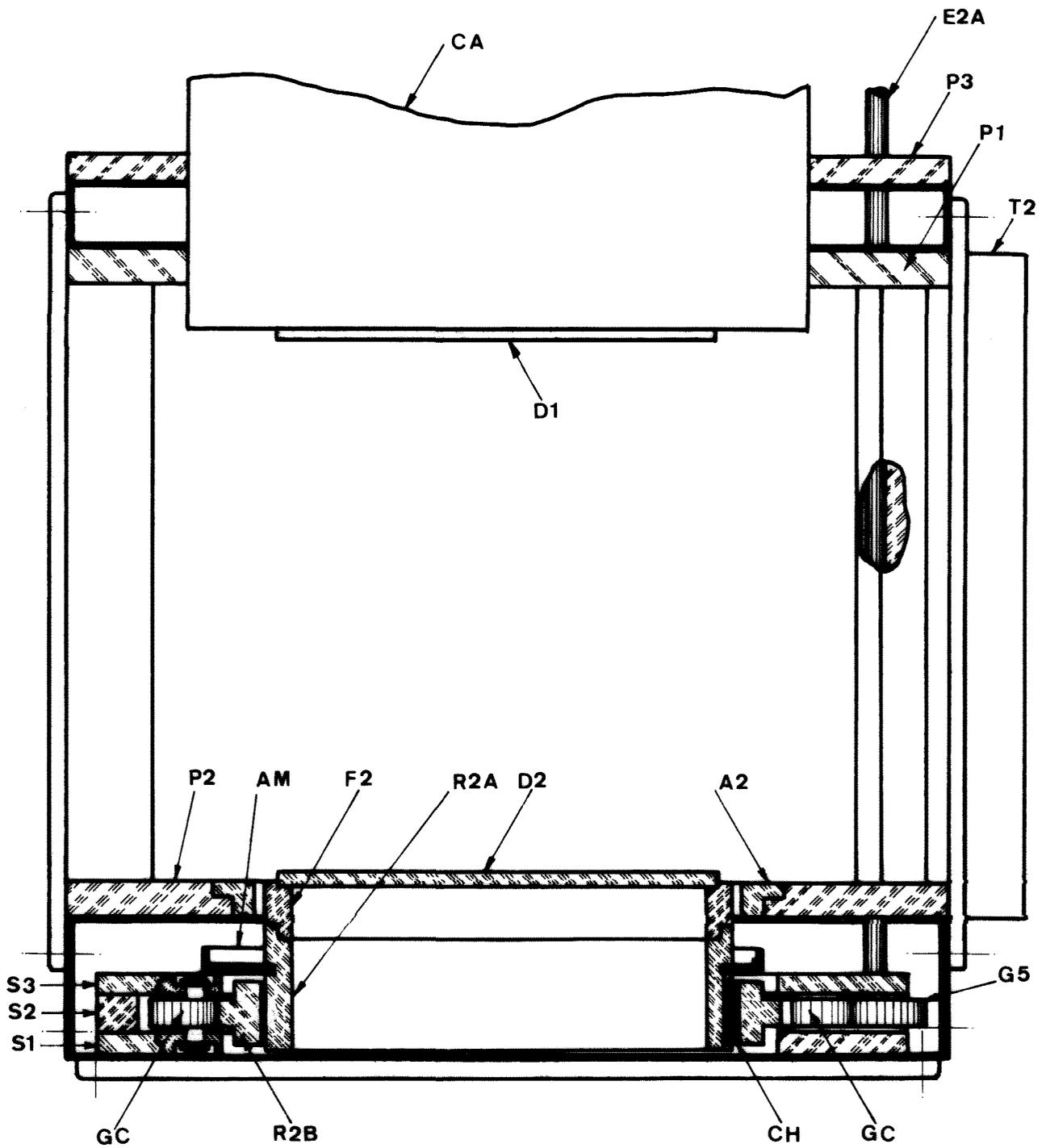


Fig. 16. Sección en alzado del tanque. Mecanismos de giro y vibración del disco D2.

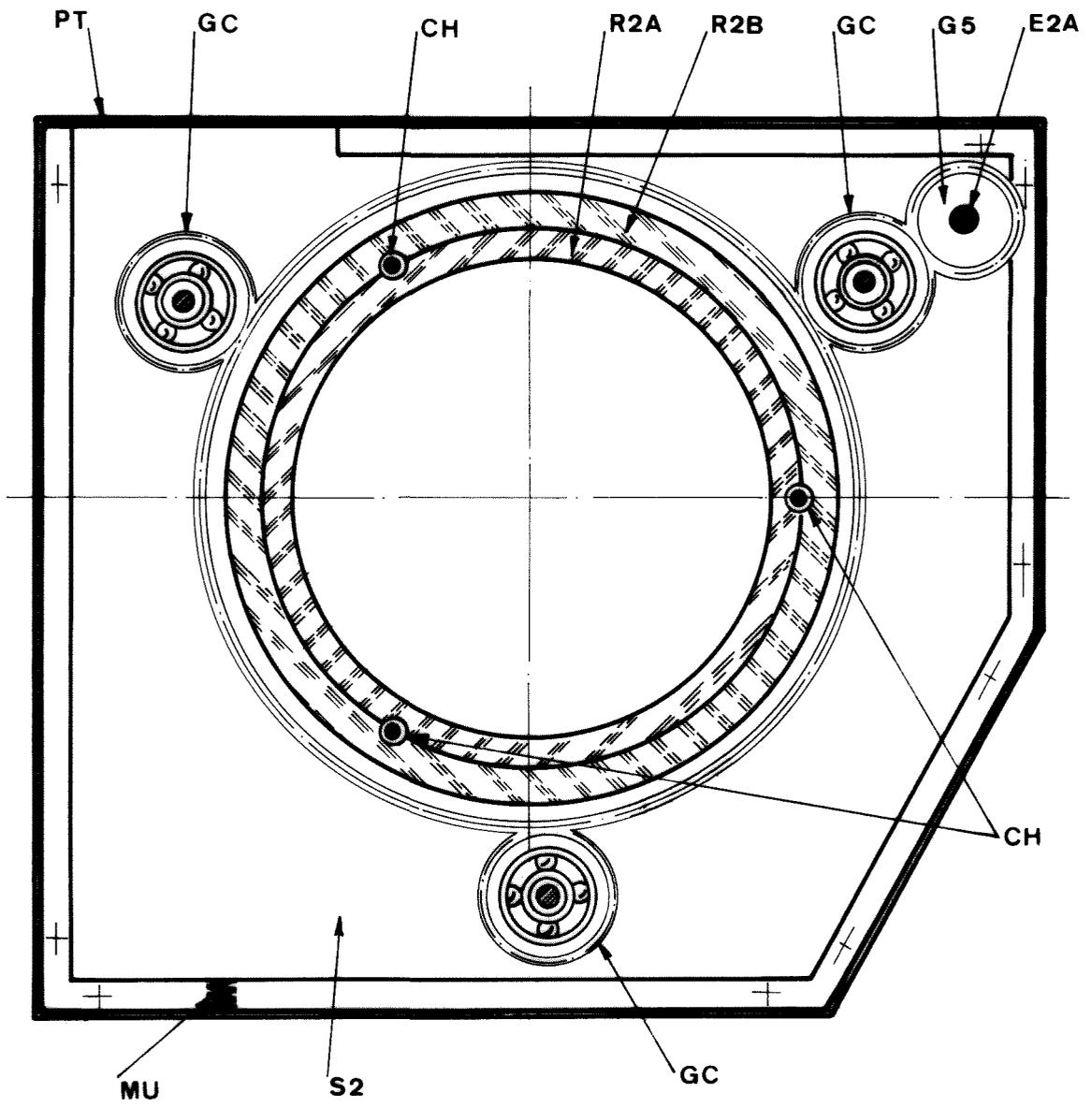


Fig. 17. Sección en planta del tanque. Mecanismo de giro del disco D2.

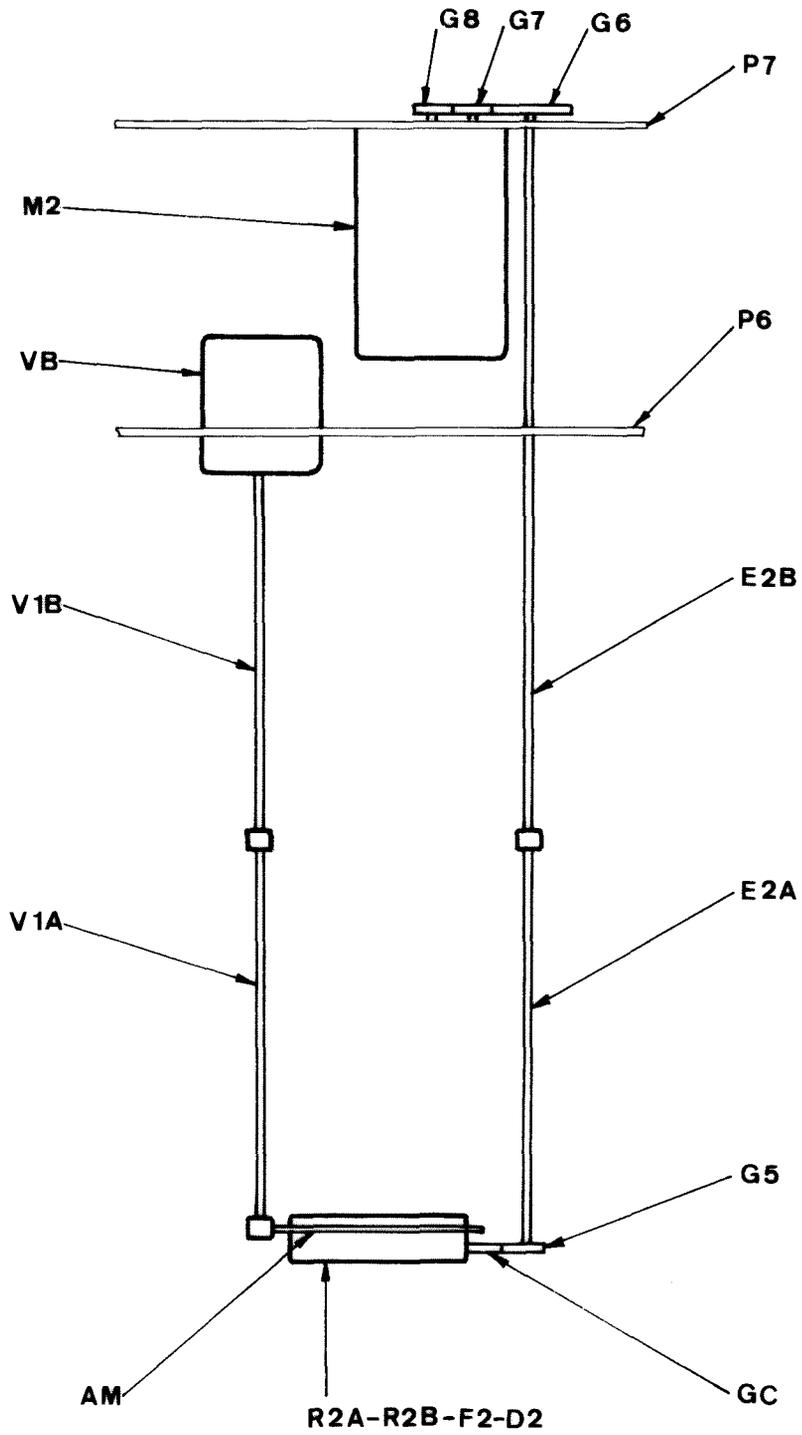


Fig. 18. Esquema de los sistemas de giro y vibración axial del disco D2.

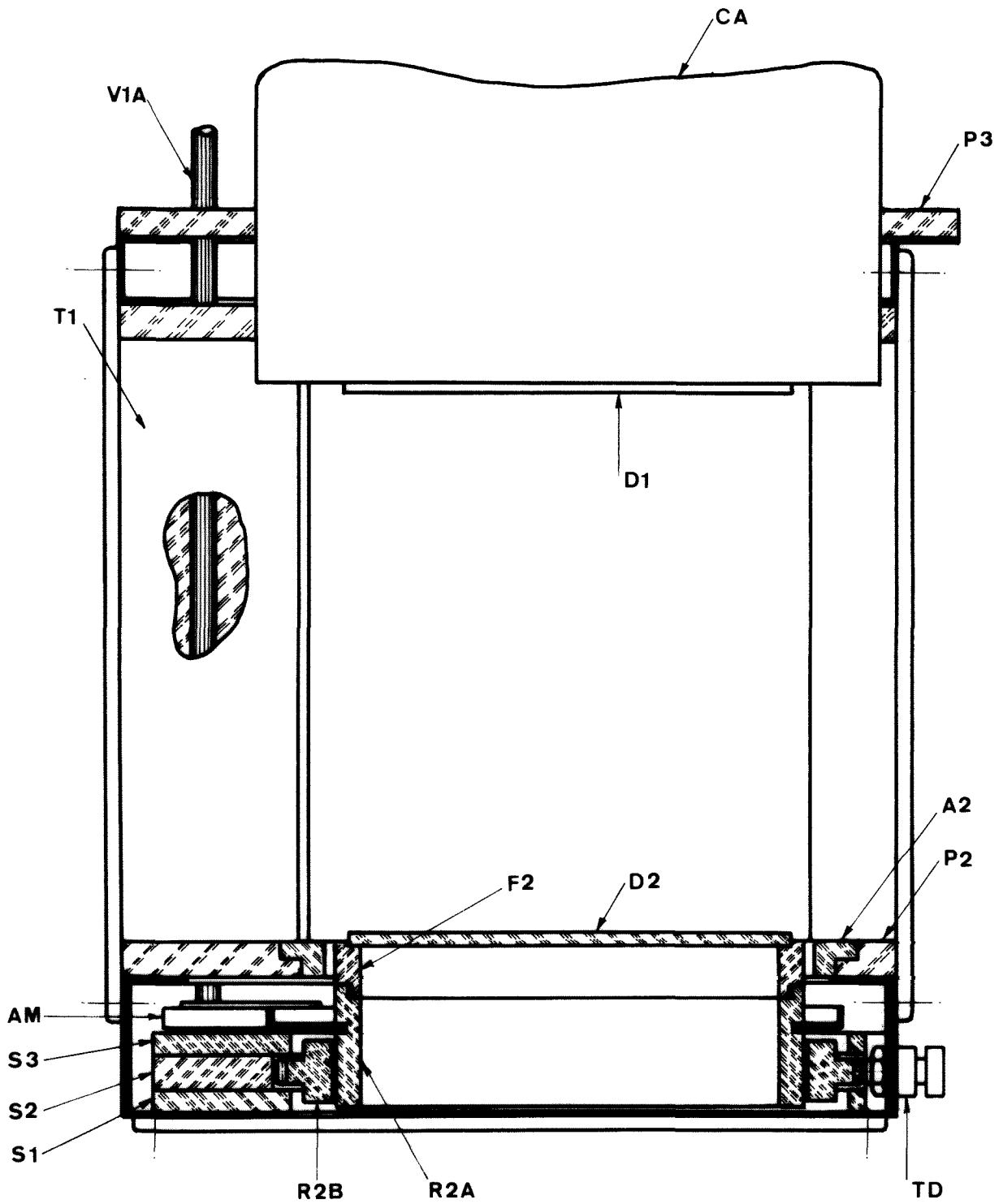


Fig. 19. Sección en alzado del tanque. Mecanismo de vibración axial del disco D2.

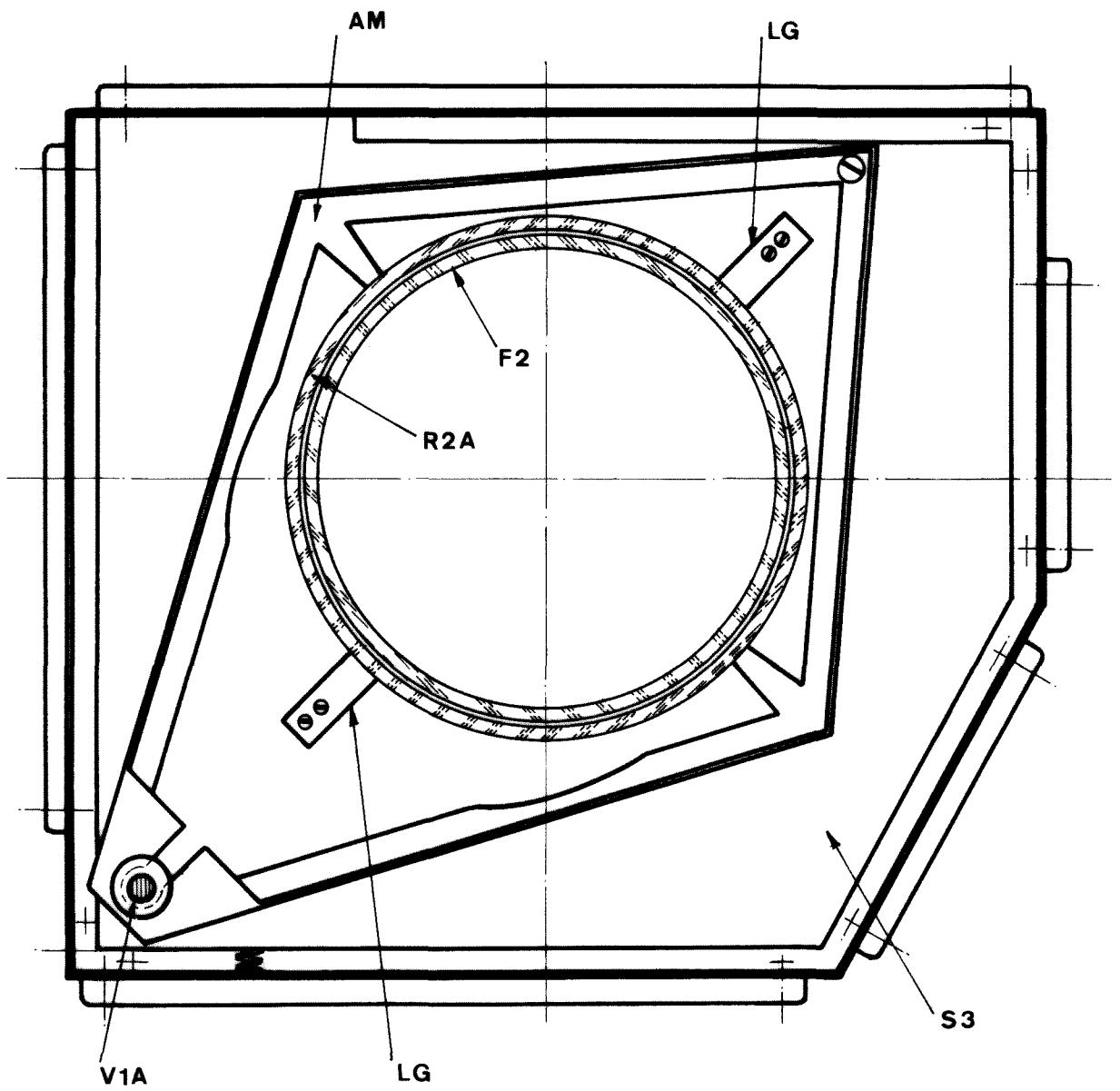


Fig. 20. Sección en planta del tanque. Mecanismo de vibración axial del disco D2.

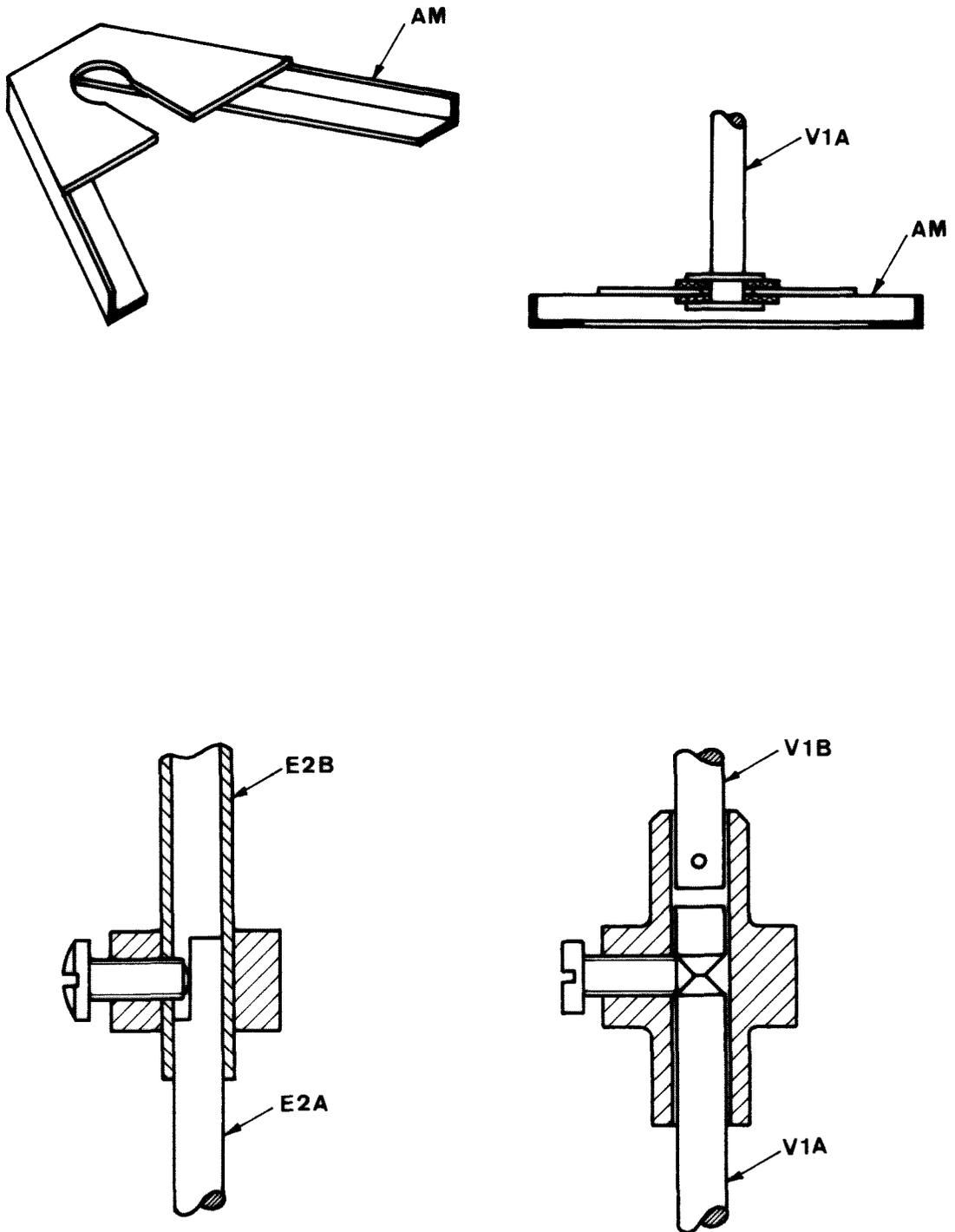


Fig. 21. Detalles de las uniones de la varilla de vibración y del eje para el giro del disco D2.

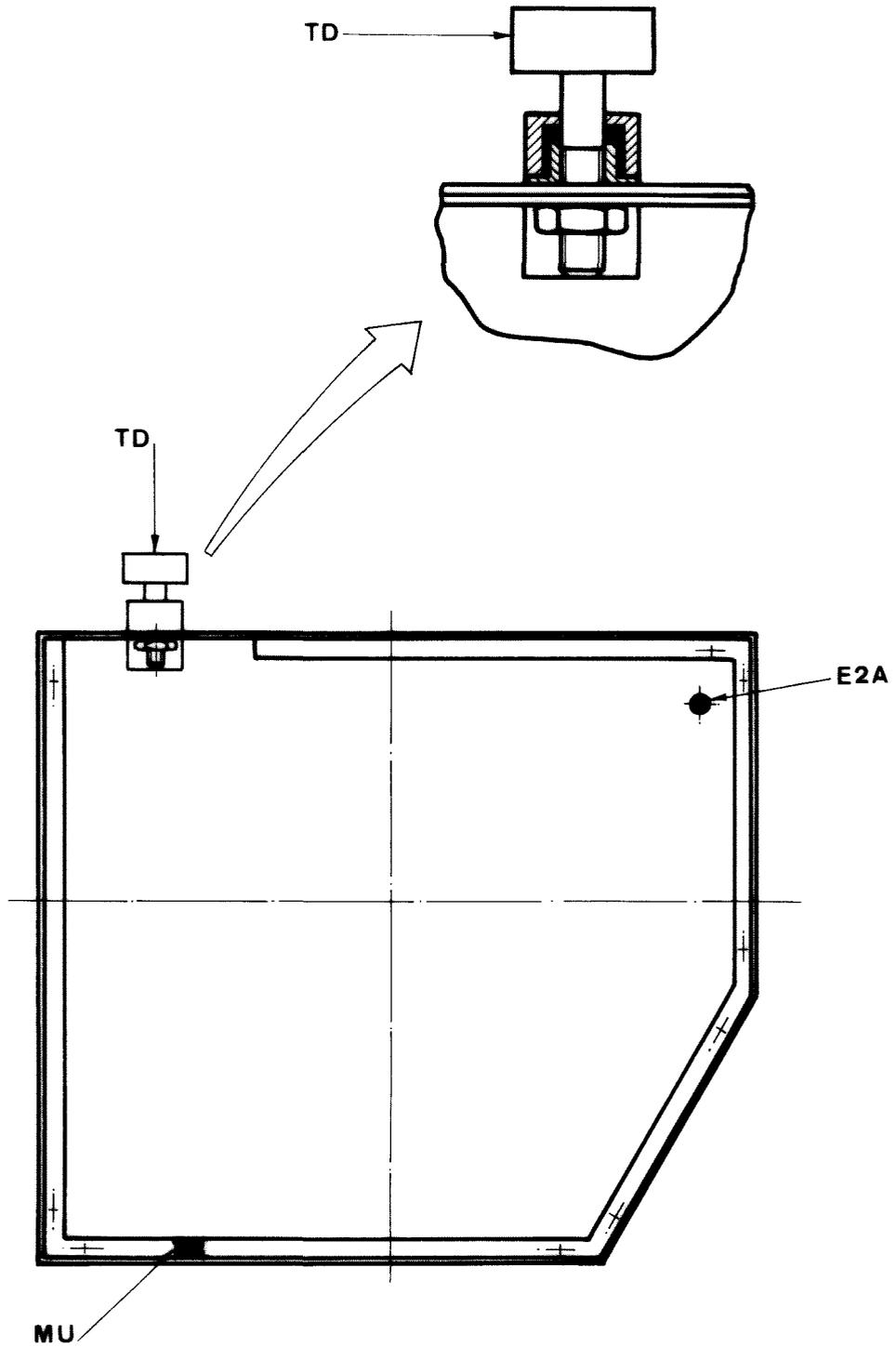


Fig. 22. Sección en planta del tanque. Mecanismo para el desplazamiento lateral del disco D2.

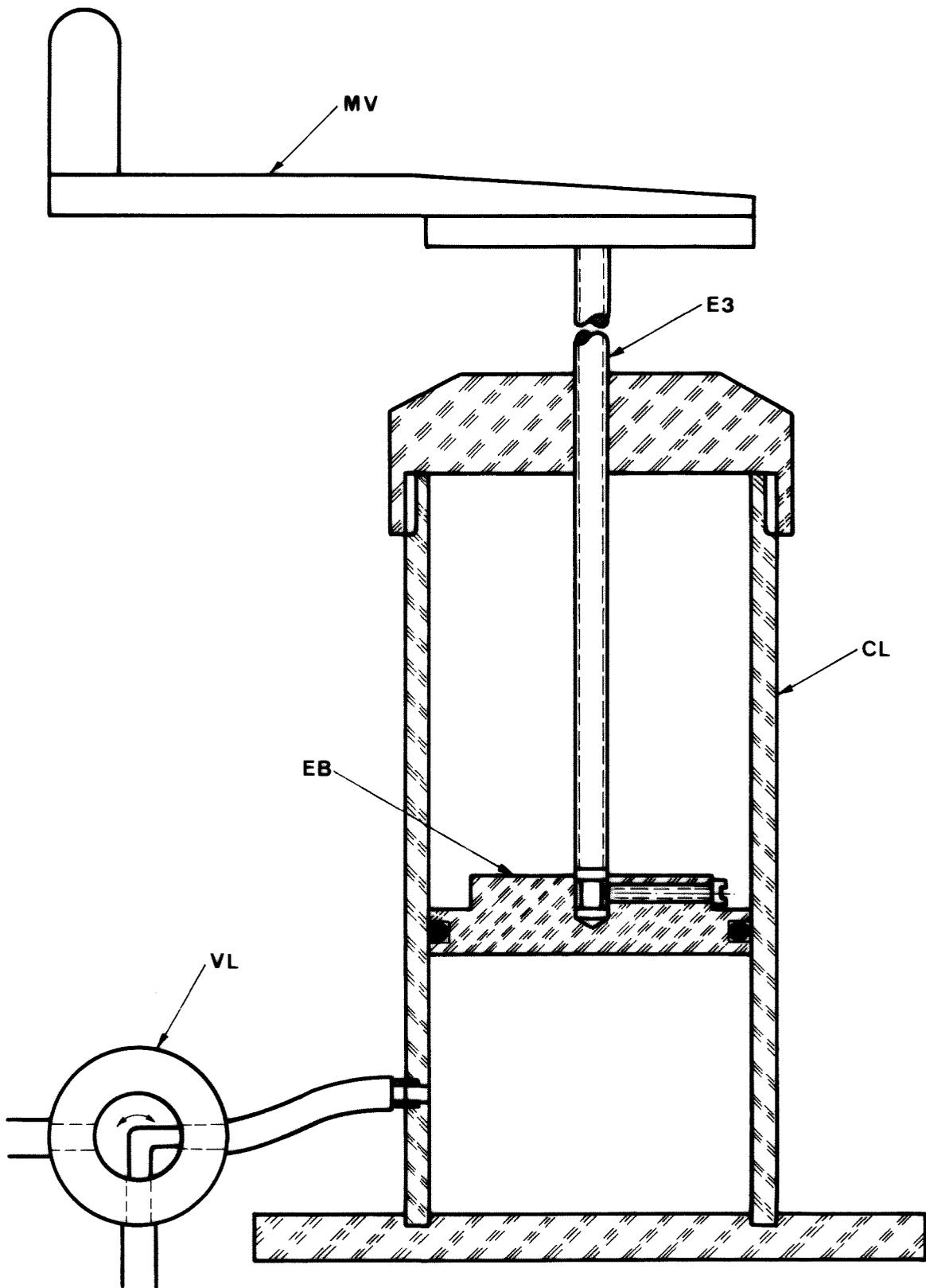


Fig. 23. Esquema del sistema de inyección.

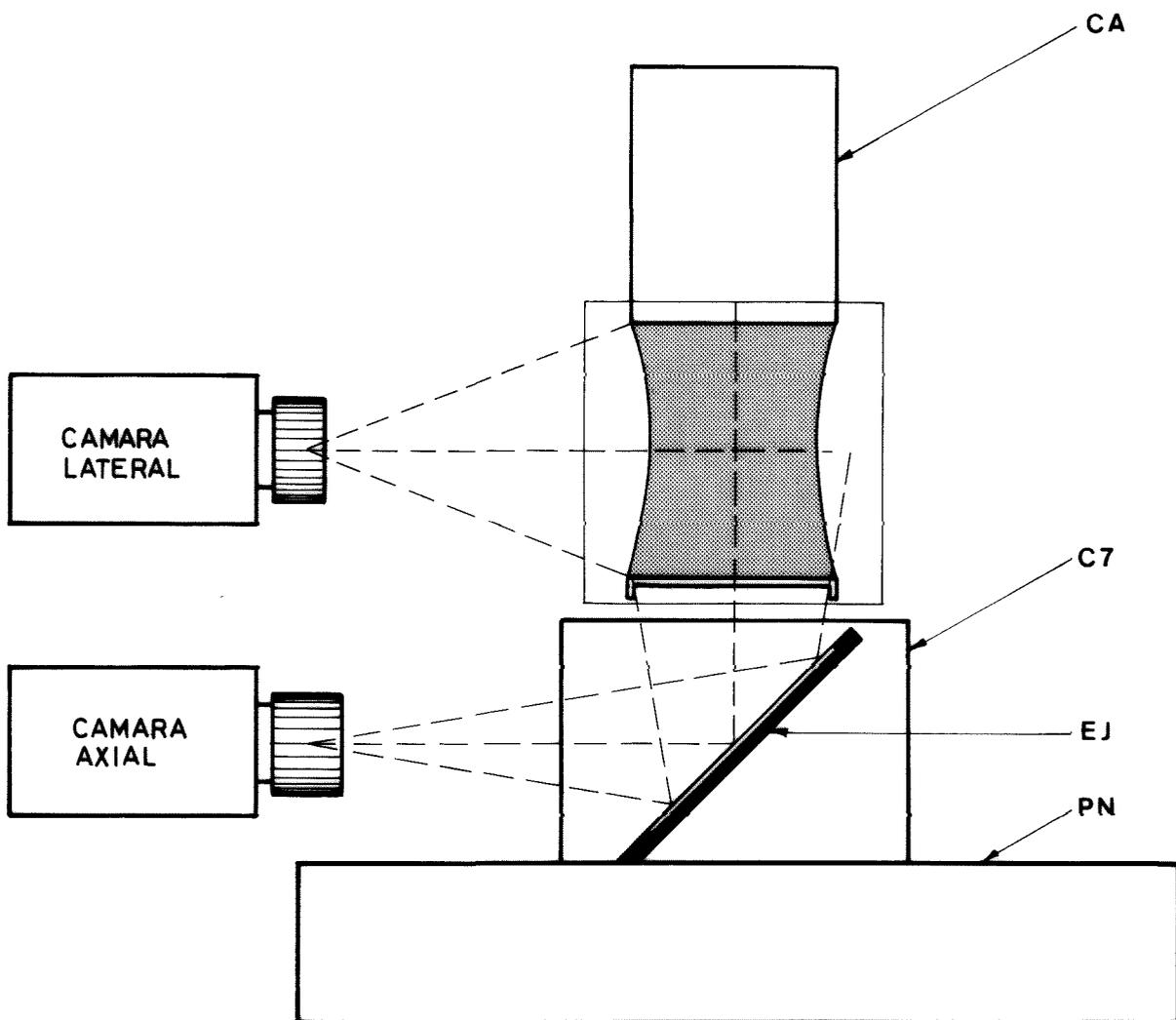
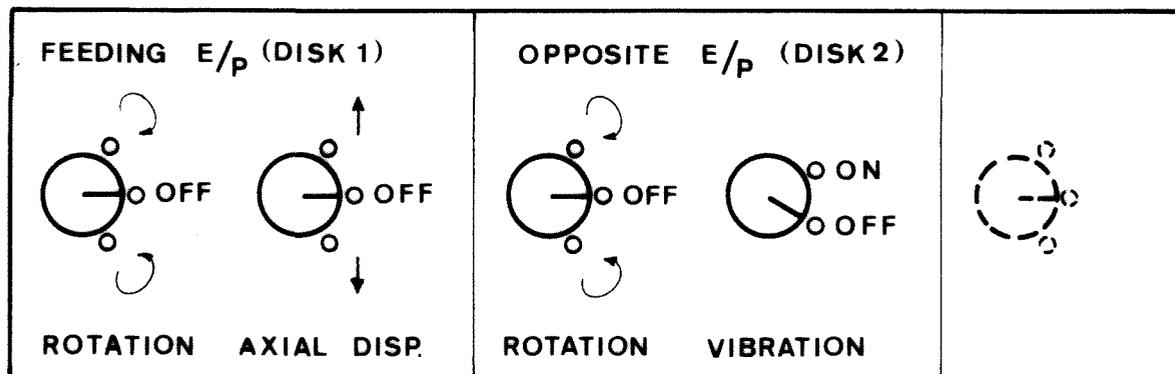


Fig. 24. Modos de filmación, axial y lateral, en el PTF.

**a**



**b**

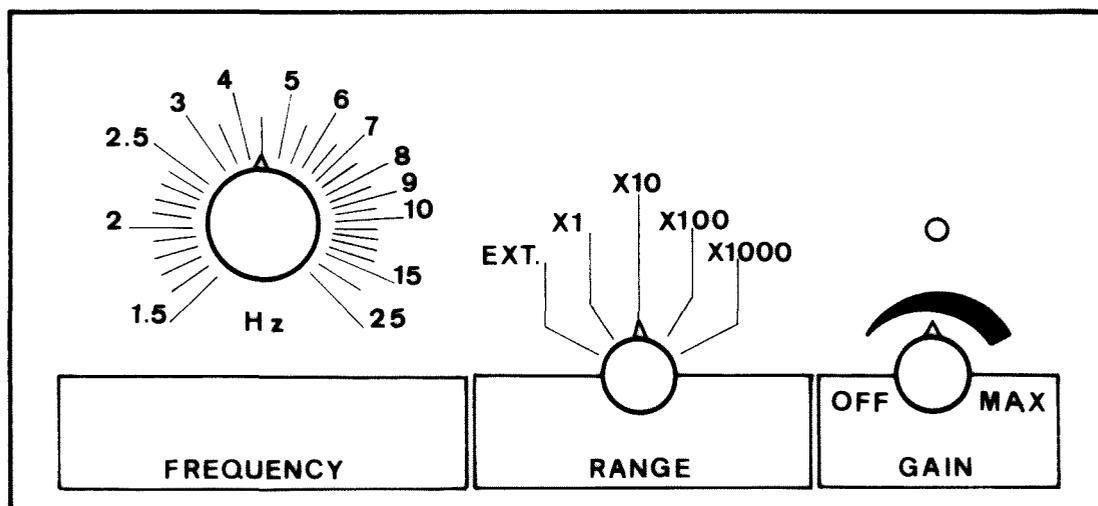


Fig. 25. Paneles de mando del PTF, a, y del oscilador/amplificador del vibrador, b.

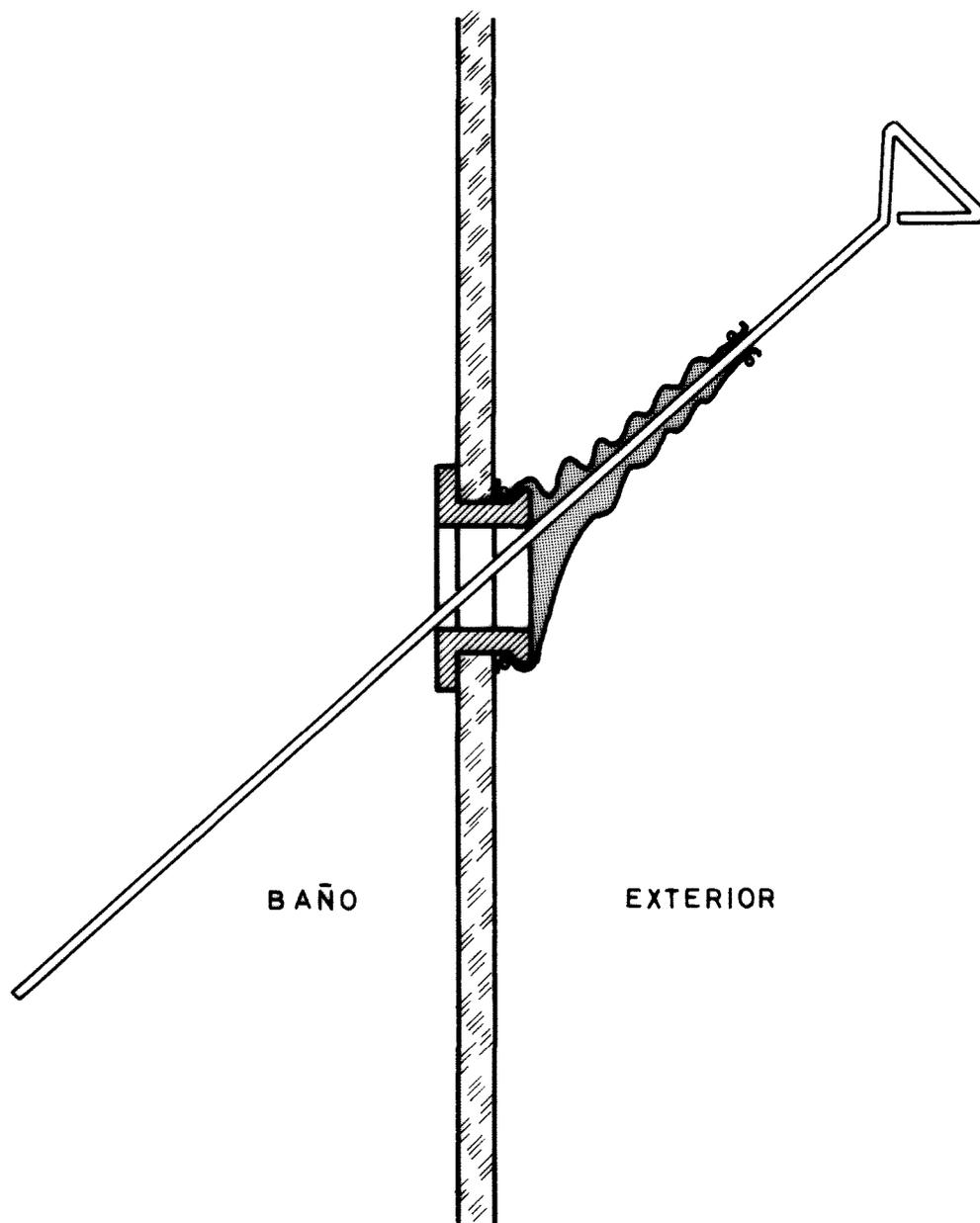


Fig. 26. Sistema para manipular en el interior del tanque.

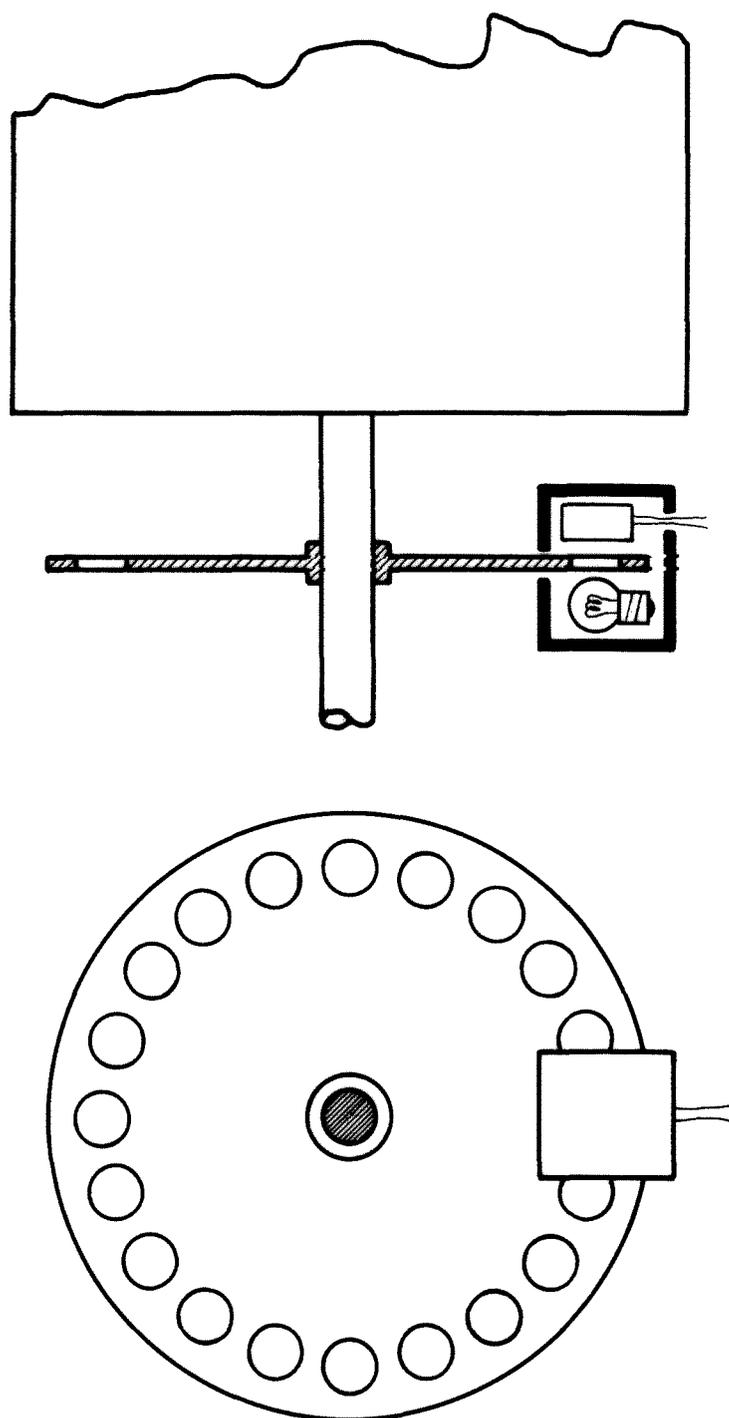


Fig. 27. Esquema de un sistema óptico de digitalización para el control de los movimientos de los discos.

REFERENCIAS

1. Lamf, "Columnas líquidas en condiciones de ingravidez. Informe final 1976", CONIE Exp. No. 253.19.1, Madrid, Diciembre 1976.
2. Trylinski, W., "Fine Mechanisms and Precision Instruments. Principles of Design", Pergamon Press, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1971.
3. Kelvin, "Reductores Serie 50000", KELVIN, S.L., Miguel Yuste 43, Madrid-17, 1973.
4. LDS, "Instruction Manual. Vibrator Model 100 Series", Ling Dynamic Systems Ltd., Baldock Rd., Royston, Hertfordshire, England, 1975.

PLANOS