

Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión

Informe Científico – Técnico

Julio 2009

Autores y Contribuciones

Este documento no podría haberse preparado sin la contribución entusiasta de un grupo numeroso de investigadores de hasta siete Universidades y Centros de investigación diferentes a quienes estamos enormemente agradecidos por su ayuda y soporte durante estos dos últimos años:

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Madrid (CIEMAT): J. M. Arroyo, F. Carbajo, N. Casal, P. Fernández, J. Ferreira, A. García, I. García-Cortés, M. González, M. Hernández, M. T. Hernández, A. Ibarra, D. Jiménez, A. Moroño, F. Mota, C. Ortiz, V. M. Queral, L. Ríos, R. Román, F. Tabarés, V. Tribaldos, J. P. de Vicente, R. Vila. *Universidad Politécnica de Madrid (UPM):* A. Abánades, R. Aracil, C. Arévalo, O. Cabellos, D. Díaz, S. Domingo, M. Ferré, L. Gámez, R. González, N. García, Y. Herreras, A. Lafuente, P. Martel, E. Martínez, J. M. Martínez-Val, E. Mínguez, J. Y. Pastor, M. Perlado, E. Río, J. Sanz, F. Sordo, M. Velarde, M. Victoria. *Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED):* M. García, D. López, A. Mayoral, F. Ogando, J. Sanz, P. Sauvan. *Universidad Carlos III de Madrid (UC3M):* D. Blanco, L. Moreno, M. A. Monge, R. Pareja. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC):* P. González, J. de No. *Universidad Autónoma de Madrid (UAM):* A. Climent, A. Muñoz. *Universidad de Alicante (UA):* M. J. Caturla

Coordinación General: A. Ibarra (CIEMAT), M. Perlado (UPM)
Coordinación Grupo de Producción y Procesado de Materiales: R. Pareja (UC3M)
Coordinación Grupo de Irradiación de Materiales: R. Vila (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Interacción Plasma-Pared: F. Tabarés (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnología de Metales Líquidos: A. Abánades (UPM)
Coordinación Grupo de Técnicas de Caracterización: M. González (CIEMAT)
Coordinación Grupo de Tecnologías de Manipulación Remota: R. Aracil (UPM)
Coordinación Grupo de Simulación Computacional: J. Sanz (UNED, UPM)
Gestión de proyecto y Edición: D. Jiménez, R. Román, I. García-Cortés (CIEMAT)

Resumen Ejecutivo

El desarrollo de la fusión como una fuente de energía se está convirtiendo en una necesidad vital debido al continuo aumento del consumo energético mundial. La fusión es una de las pocas opciones energéticas inagotables, respetuosas con el medio ambiente y capaces de cubrir la demanda previsible de energía.

El desarrollo de la fusión es uno de los grandes retos tecnológicos de la humanidad. Para la Unión Europea (UE) este campo es uno de sus principales programas de investigación, como demuestra el que en junio de 2005 acordara junto a EE.UU., Rusia, China, Corea del Sur, Japón y la India, la construcción del proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). ITER, que significa camino en latín, es un reactor experimental cuyo propósito será demostrar la viabilidad científica de la fusión.

Con el diseño de ITER ya finalizado, en los próximos 20-30 años se producirá un gran aumento, **no tanto en la investigación básica en física de plasmas como en el desarrollo tecnológico de los componentes de los futuros reactores comerciales de fusión**. La selección, desarrollo y ensayo de los materiales y elementos de los diversos sistemas del reactor son el desafío más importante de la investigación en fusión, junto al diseño de los sistemas de extracción de energía y reproducción de tritio.

España tiene una oportunidad única de estar a la cabeza de la participación europea en este novedoso campo tecnológico y para ello requiere nuevas instalaciones en las que poder simular las condiciones extremas a las que se verán sometidos los materiales y/o componentes en el interior de un reactor de fusión.

El proyecto que se describe en este informe pretende la construcción, en la Comunidad de Madrid, de una Instalación Científico-Técnica Singular (Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión – *TechnoFusión*) en la que se concentren infraestructuras apropiadas para el desarrollo de las tecnologías necesarias para los futuros reactores comerciales de fusión y garantizar una destacada participación española tanto de grupos de investigación como de empresas.

TechnoFusión no supondrá un salto en el vacío. La comunidad científica española ya cuenta con la masa crítica de expertos en la ciencia y las tecnologías necesarias para el desarrollo de este ambicioso proyecto, como sobradamente demuestra la experiencia de décadas que España posee en el campo de la fusión. *TechnoFusión* persigue precisamente aprovechar las capacidades existentes en grupos de investigación de universidades, OPIs y empresas y enfocarlos en las áreas que se consideran prioritarias como la creación, ensayo y análisis de los materiales que se precisan para el desarrollo de un reactor comercial de fusión termonuclear, o su compleja manipulación remota.

Las condiciones que deberán soportar los componentes del reactor y las propiedades que de ellos se esperan los sitúan en un terreno desconocido que

precisamente *TechnoFusión* pretende explorar. Por ello se propone la construcción de aquellas instalaciones necesarias para la fabricación, prueba y análisis de los materiales más críticos, así como para impulsar el desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del comportamiento de dichos materiales bajo condiciones tan exigentes.

Más concretamente los esfuerzos en *TechnoFusión* se concentrarán en la creación de infraestructuras para abordar las siguientes áreas de investigación: 1) *producción y procesamiento de materiales*, 2) *irradiación de materiales*, 3) *interacción plasma-pared (cargas térmicas sobre materiales y mecanismos atómicos de daño)*, 4) *tecnología de metales líquidos*, 5) *técnicas de caracterización*, 6) *tecnologías de manipulación remota* y 7) *simulación computacional*. Para ello se propone la construcción de un gran Centro científico-técnico de investigación, *TechnoFusión*, constituido como una única instalación singular con capacidades para desarrollar estas siete grandes áreas de investigación que a continuación se describen:

1) *Producción y Procesado de Materiales*. Los materiales con los que se fabricarán los futuros reactores de fusión aún no se han decidido, en parte debido a que todavía no se han reproducido las condiciones extremas que tendrán que soportar. Por lo tanto, es de la mayor importancia contar con instalaciones que permitan la fabricación de nuevos materiales a escala semiindustrial y a nivel de prototipo. Entre los de mayor prioridad identificados se encuentran los materiales metálicos tales como los aceros de baja activación reforzados del tipo ODS (*Oxide Dispersion Strengthened steels*) y las aleaciones de tungsteno. Para su fabricación se dispondrá de equipos que actualmente son escasos o no existen en España como por ejemplo un Horno de Inducción a Vacío (VIM), un Horno de Prensado Isostático en Caliente (HIP), un Horno de Sinterización Asistida por Corriente de Plasma Pulsada (SPS) o un Sistema de Proyección por Plasma en Vacío (VPS).

2) *Irradiación de Materiales*. Reproducir exactamente las condiciones del interior de un reactor sólo será posible en un verdadero reactor. Aún así es factible simular los efectos que los neutrones y la radiación *gamma* producirán sobre los materiales irradiando éstos con iones y electrones. La simulación de la radiación neutrónica se realizará mediante el uso simultáneo de tres aceleradores de iones: un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 6 MV para la irradiación con He, un acelerador de iones ligeros tipo tándem de 5-6 MV para la irradiación con H (ó D) y un acelerador de iones pesados de tipo ciclotrón de $k = 110$ para la implantación de iones pesados (Fe, W, Si, C) o de protones de alta energía. Adicionalmente, se contará con un imán de alto campo (5-10 T) para el estudio del efecto simultáneo de la irradiación y el campo magnético sobre los materiales. La simulación del efecto de la radiación ionizante, *gamma*, se realizará mediante un acelerador de electrones de energía fija de tipo Rhodotron de 10 MeV, cuyo uso será compartido con otras áreas de la Instalación.

3) *Interacción Plasma-Pared*. En un futuro reactor de fusión, además de la radiación, algunos materiales estarán expuestos a enormes cargas térmicas por su interacción con el plasma. Debido a ello, será imprescindible no sólo reproducir las condiciones estacionarias de alta densidad, baja temperatura y alta potencia sino también probar los materiales ante eventos transitorios violentos (conocidos como ELM's en la literatura de física de plasmas). Se prevé contar con dos dispositivos de generación de plasma: una máquina lineal de plasma, encargada de reproducir las condiciones estacionarias, y un acelerador lineal de plasma cuasiestacionario QSPA

(*Quasi-Stationary Plasma Accelerator*) que simulará los transitorios. Ambos serán capaces de generar plasmas de H, D, He y Ar.

4) Tecnología de Metales Líquidos. La utilización de metales líquidos como el litio en distintos componentes de ITER e IFMIF¹, y a más largo plazo, en los futuros reactores de fusión, hace que las tecnologías asociadas tengan un interés creciente. Su uso como refrigerante, productor de tritio, reproductor neutrónico o como moderador en condiciones extremas no está suficientemente estudiado. Esta área de experimentación contará con varios circuitos de litio líquido acoplados al acelerador de electrones con los objetivos principales de estudiar la superficie libre de metales líquidos con deposición interna de calor y la compatibilidad de los materiales estructurales con el metal líquido en presencia de radiación. Además se podrá investigar la influencia de la presencia de campos magnéticos en dichos fenómenos y desarrollar las tecnologías asociadas a los métodos de purificación del metal líquido, técnicas de enriquecimiento del litio, sistemas de extracción de tritio y aspectos de seguridad del metal líquido.

5) Técnicas de Caracterización. Se propone para el Centro un conjunto amplio de técnicas para la caracterización exhaustiva de materiales comerciales o desarrollados en la propia instalación antes, durante y después de su exposición a la radiación o a las cargas térmicas. Se contará para ello con una gran variedad de métodos de caracterización mecánica (máquinas electromecánicas, minimáquinas de ensayos mecánicos, máquinas de fluencia térmica, técnicas de nanoindentación, etc.), composicional (Espectrometría de Masas de Iones Secundarios (SIMS) y Sonda Atómica Topográfica (APT)), estructural y microestructural (Microscopía Electrónica de Alta Resolución (HRTEM) y Difracción de Rayos X (DRX)) o de procesamiento de materiales (Sistemas de Haces de Iones Focalizados acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido (FIB/SEM)). Se dispondrá también de diversos sistemas para la caracterización de las propiedades físicas (eléctricas, dieléctricas, ópticas, etc.). *TechnoFusión* aspira a convertirse en el laboratorio nacional de referencia en la caracterización de materiales, ya que algunas de las técnicas anteriormente mencionadas, como el SIMS o la APT, no se encuentran fácilmente disponibles en España.

6) Tecnologías de Manipulación Remota. Las condiciones en el interior de un reactor de fusión serán incompatibles con la reparación o sustitución de sus componentes manualmente, siendo imprescindible su manejo por manipulación remota. Así, es de la máxima importancia no sólo el desarrollo de nuevas técnicas robóticas, compatibles con estas condiciones hostiles, sino también la acreditación de las existentes para su uso en instalaciones como ITER o IFMIF. El tamaño de los componentes que se van a usar y las dificultades de su disposición en el espacio del que se dispone provoca la necesidad de desarrollos hasta ahora no considerados en las técnicas de manipulación. Se contará con una instalación, acoplada al acelerador de electrones, donde los prototipos experimentarán condiciones de trabajo con radiación *gamma* similares a las esperadas durante las tareas de mantenimiento de un reactor. Por otra parte, algunos de los prototipos considerados para la demostración de la manipulación remota son: los *Port Plugs* (PP) de diagnóstico y los *Test Blanket Modules* (TBM) de ITER, o los módulos de irradiación de IFMIF.

¹ IFMIF es una fuente de neutrones de alta intensidad y espectro equivalente al de un reactor de fusión. En el diseño final consta de dos aceleradores de deuterones que inciden sobre un blanco de Li líquido donde por reacciones nucleares de *stripping* se genera un espectro neutrónico de características similares a las del reactor)

7) Simulación Computacional. Estos estudios teóricos son imprescindibles para llegar allí donde las condiciones experimentales no alcanzan y para acelerar el ciclo de desarrollo de los nuevos sistemas completos de una futura planta comercial de fusión. *TechnoFusión* se propone impulsar un ambicioso plan de simulación computacional aunando la experiencia existente en el ámbito de la fusión con los recursos de la Red Nacional de Supercomputación. Sus objetivos abarcan desde la integración de un entorno de simulación global de un reactor comercial de fusión, la interpretación de resultados, pasando por la validación de herramientas numéricas, o el desarrollo de nuevas herramientas. Un objetivo también imprescindible es la creación de sistemas de adquisición de datos y visualización de resultados asociados.

Partiendo de la contrastada experiencia existente en grupos de investigación de Universidades, Organismos Públicos de Investigación y departamentos de investigación de empresas, *TechnoFusión* propone la construcción de una gran infraestructura científica que persigue contribuir significativamente al desarrollo de las tecnologías necesarias para la construcción de los reactores comerciales de fusión. El proyecto que aquí se describe permitirá la generación de conocimiento tecnológico de gran impacto para cualquier tipo de reactor de fusión, independientemente del concepto en el que esté basado (magnético o inercial). *TechnoFusión* pretende agrupar recursos humanos y materiales suficientes con el objetivo de contribuir al desarrollo de una fuente segura, limpia e inagotable de energía para las generaciones venideras. España no puede desaprovechar la oportunidad única que representa *TechnoFusión* y que sin lugar a dudas situaría a la Comunidad de Madrid como uno de los referentes internacionales en la ciencia y tecnología de materiales.

7. Área de experimentación de Tecnología de Metales Líquidos

7.1. Introducción

La utilización de los metales líquidos se ha centrado hasta el momento en el sector energético en aplicaciones como la de fabricación de baterías industriales, refrigeración de reactores nucleares de fisión o incluso de centrales termosolares. Para estos usos se trabaja con metales como el sodio (Na) o el eutéctico Plomo-Bismuto (Pb-Bi), por su buen comportamiento como refrigerante y su integridad física a altas temperaturas. En la actualidad se están desarrollando nuevas aplicaciones tecnológicas en las que se cuenta con metales líquidos como estaño, mercurio, litio, plomo o el eutéctico plomo-litio.

En particular, los metales líquidos tienen una serie de características que los hacen muy interesantes para futuras aplicaciones relacionadas con la tecnología de fusión. Debido a las propiedades termohidráulicas de algunos de ellos, éstos pueden jugar un papel crucial como refrigerantes, para extraer la energía producida por la reacción de fusión. Sus propiedades a alta temperatura les hacen ser potenciales candidatos como materiales expuestos a la alta radiación del plasma en los componentes de la primera pared o en divertores y limitadores. En el caso del litio (Li), a éstas propiedades termohidráulicas se unen sus propiedades neutrónicas (producción de tritio por captura neutrónica), que lo convierten en un candidato ideal para formar parte del *blanket* como envolturas regeneradoras de tritio, garantizando así la autosostenibilidad de las futuras máquinas de fusión. En determinados conceptos de envolturas regeneradoras, se cuenta además con el plomo (Pb) para actuar como multiplicador neutrónico en los rangos de energía neutrónica presentes en los reactores de fusión, favoreciendo la capacidad de regeneración del tritio combustible del plasma.

Los metales líquidos se emplean también en las fuentes de neutrones de alta intensidad. Los de alto número atómico, como el plomo o el mercurio (Hg), pueden utilizarse como fuentes de espalación por la alta relación neutrón/protón en su núcleo. Los metales líquidos ligeros, como el litio, se utilizan igualmente como fuente de neutrones mediante reacciones de *stripping* o rotura nuclear. El litio se usa además en aceleradores de partículas, concretamente, en el acelerador RIA (*Rare Isotope Accelerator*) de EE.UU., se ha propuesto utilizar una capa fina de este metal líquido para aumentar la carga estática y mejorar así la eficiencia en la aceleración.

Cada una de estas aplicaciones de los metales líquidos, y algunas otras que no se han mencionado, tienen unas condiciones de uso específicas y en ellas, el metal líquido está sometido a la acción de fenómenos físicos peculiares y diferentes. Estos fenómenos dependen en gran medida del tipo de metal líquido, pero presentan unas características comunes que hace que muchos de los desarrollos tecnológicos asociados estén fundados en los mismos principios e hipótesis, sobre todo en lo relativo a su uso como fluidos refrigerantes.

Tanto la propuesta de nuevas aplicaciones (por ejemplo, las relativas a la tecnología de fusión) como la necesidad de profundizar en determinados aspectos tecnológicos no totalmente resueltos en el momento actual, hace imprescindible la

creación de infraestructuras científico-tecnológicas que permitan estudiar los siguientes aspectos:

- El análisis de compatibilidad de materiales.
- El comportamiento termofluidomecánico.
- La magnetohidrodinámica de metales líquidos.
- La validación de herramientas de diseño con metales líquidos.
- Las posibles configuraciones y uso de componentes en las nuevas aplicaciones, tanto de forma individualizada como integrada.
- El desarrollo de componentes y equipos de caracterización e instrumentación en los circuitos de metal líquido.
- El diseño de sistemas auxiliares a los propios circuitos de metal líquido, como los sistemas de purificación o de llenado de circuitos, la instrumentación asociada, etc.

Teniendo en cuenta todo lo explicado anteriormente, y las necesidades de investigación actuales de la tecnología de fusión se propone, en el marco de *TechnoFusión*, la creación de un **Área de experimentación de Tecnología de Metales Líquidos (ATML)**, fundamentalmente de litio, lo suficientemente flexible como para poder abarcar un amplio rango de experimentos y que será de gran interés en el campo de la fusión.

7.2. Objetivos

El Área ATML de *TechnoFusión* se plantea con el propósito fundamental de constituirse como una infraestructura científico-técnica de referencia para el desarrollo de la tecnología relativa a metales líquidos en el marco de los programas internacionales de fusión. La consecución de este fin supondrá también albergar en *TechnoFusión* un foco de conocimiento que proporcione una transferencia tecnológica real hacia el sector industrial regional y nacional.

Con el objeto de diseñar los experimentos que se llevarán a cabo, se ha realizado una revisión del estado del arte de las investigaciones en los metales líquidos claves en fusión (Li y Pb-Li). En ese análisis, que se presenta en el siguiente capítulo, se ha llegado a la conclusión de que el eutéctico plomo/litio es el más estudiado actualmente de cara a los desarrollos de referencia para futuras máquinas de fusión. Así, la mayor parte de los experimentos existentes en las instalaciones internacionales están precisamente basados en este fluido, con lo que resulta complicado convertirse en una instalación de referencia para integrarse en programas internacionales sin entrar en competencia o en duplicidad de tareas. Por otra parte, existe un interés creciente en el estudio tecnológico del litio como elemento que puede formar parte del desarrollo de la fusión, ya sea como fuente de neutrones para experimentos de irradiación de materiales, como en los elementos constituyentes de los reactores de fusión, como *blankets*, divertores, y primera pared.

Considerando lo anterior, la apuesta del Área ATML de *TechnoFusión* se centrará en la realización de experimentos con **litio líquido** dado que constituye una apuesta estratégica por la posibilidad de presentar la candidatura española para albergar IFMIF al estar basada esta instalación en un lazo de litio líquido. La experiencia previa y el dominio de esa tecnología constituirá sin duda un factor determinante para el éxito de la candidatura si ésta finalmente se presenta. Además, en el mundo existe una limitada cartera de instalaciones de litio por lo que habrá una menor duplicidad de esfuerzos y competencia, permitiendo que *TechnoFusión* se convierta en una instalación de referencia.

La instalación que se propone en esta Área de experimentación de *TechnoFusión* tendrá como objetivos concretos:

- La adquisición de información tecnológica crítica relacionada con el uso de litio líquido en temas como:
 - El comportamiento de la superficie libre del metal líquido bajo condiciones relevantes para su aplicación.
 - El estudio de la corrosión/erosión y, en general, compatibilidad con materiales de interés.
 - Los efectos magnetohidrodinámicos.
 - El comportamiento termohidráulico.
 - Las propiedades químicas y el efecto de impurezas.
 - Los sistemas de purificación.
 - Los aspectos de seguridad.

- La validación de los actuales códigos de diseño como, por ejemplo, códigos de fluidodinámica computacional (CFD).

Esta Área de experimentación contará además con el valor añadido de poder acoplar un acelerador de electrones al metal líquido. Esto permitirá, por una parte, una deposición de calor en el seno del fluido, con lo que se podrá simular la deposición de potencia de los deuterones en el *target* de IFMIF, permitiendo el estudio del comportamiento del litio líquido en condiciones extrapolables a la de la futura fuente de neutrones. Por otra parte, mediante el acelerador de electrones se podrá obtener un campo de radiación *gamma* para el estudio de materiales estructurales en contacto con el litio líquido y radiación simultáneamente. Estos experimentos permitirán entender e identificar en estos materiales problemas asociados a la exposición conjunta de radiación y del contacto con el litio líquido en cuanto a fenómenos de corrosión, difusión de gases, propiedades químicas, etc. Es importante destacar que el conjunto de experimentos descritos en este último párrafo no se realiza en la actualidad en ningún laboratorio del mundo.

7.3. Situación internacional de las tecnologías propuestas

7.3.1. Estado actual de las tecnologías de litio líquido

Debido a sus excelentes propiedades, los metales líquidos y sus tecnologías asociadas se están desarrollando hoy en día fundamentalmente en los siguientes campos de la fusión:

a) Target de litio líquido de IFMIF ⁵²

IFMIF está basada en dos aceleradores que producen cada uno un haz de deuterones que impactan en una corriente de litio puro líquido (Figura 7.1). Las reacciones de *stripping* deuterón-litio producirán un haz de neutrones con las características adecuadas para simular las condiciones de irradiación de un reactor de fusión. Uno de los requisitos críticos de IFMIF es conseguir una superficie libre estable en la corriente de litio, para evitar que el campo de neutrones producido se vea alterado o que la energía de los deuterones se deposite en zonas no previstas. Pero además, existe un gran número de incertidumbres respecto al comportamiento del litio bajo el haz de deuterones cómo la deposición energética en el seno del fluido que podría ocasionar fenómenos desconocidos que afecten a la estabilidad superficial o la evaporación y las salpicaduras del metal líquido que podrían afectar al vacío de los aceleradores. Por otra parte, los fenómenos de erosión y corrosión de los distintos componentes en contacto con el litio líquido y sometidos a radiación son una incógnita y podrían, a su vez, aumentar las inestabilidades al aumentar las impurezas en circulación y modificar la geometría de los componentes.

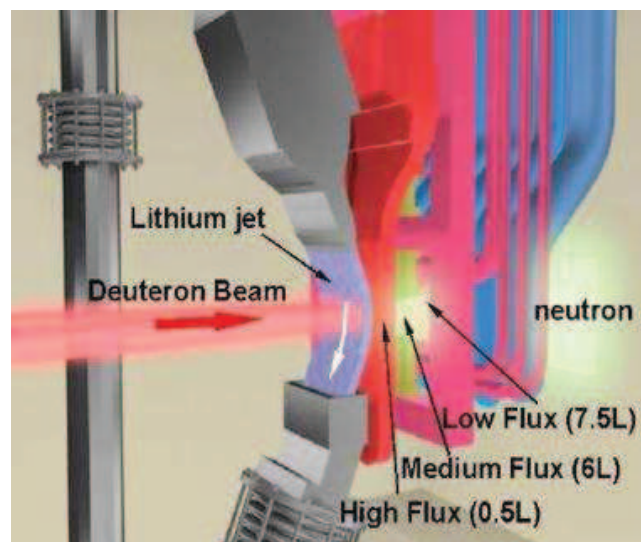


Figura 7.1. Representación de la fuente de neutrones de IFMIF.

⁵² IFMIF Comprehensive Design Report, January 2004.

Por todo lo anterior, la investigación de todos estos fenómenos es fundamental, siendo de especial importancia contar con unas condiciones experimentales relevantes y considerando, a ser posible, la combinación o acoplamiento de todos los factores implicados. A esto hay que añadir el desarrollo necesario de los sistemas auxiliares de la instalación de metal líquido, entre los que se encuentran sistemas de purificación y de instrumentación.

b) Primera pared, divertores y limitadores de nuevos conceptos de reactores de fusión.

El litio puro es también muy atractivo como elemento de primera pared, divertores y limitadores de los reactores de fusión (Figura 7.2). Los estudios experimentales han mostrado resultados esperanzadores en el comportamiento del litio como elemento de primera pared, tanto por la buena tolerancia del plasma (elemento de baja Z y bajo reciclado), como por su capacidad para manejar altas cargas térmicas (~10 MW/m²). Además por tratarse de un líquido, su superficie se verá menos afectada por las cargas térmicas generadas por eventos transitorios, protegiéndose de éstos gracias a la evaporación, mientras que los materiales sólidos son incapaces de soportar altas deposiciones de potencia y además sufren mayores daños por irradiación.

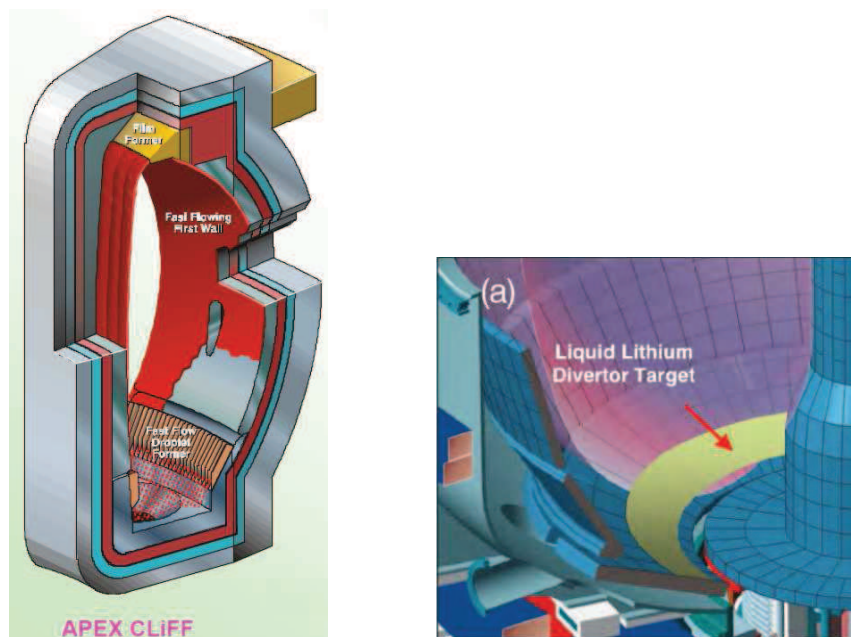


Figura 7.2. Ejemplos de aplicaciones de metal líquido en la primera pared (izquierda) y divertor (derecha) de los reactores de fusión.

No obstante, estas aplicaciones presentan varios problemas: la superficie libre de metal líquido dentro de los dispositivos de fusión se verá afectada por fuerzas

mecánicas y electromagnéticas que pueden producir efectos indeseables⁵³ como ondas, inestabilidades magnetohidrodinámicas, salpicaduras, etc. Además, la composición química del litio puede verse modificada por las condiciones ambientales extremas, pudiendo incluso llegar a ser diferente en la superficie y en el centro del fluido, afectando a su estabilidad.

Para solucionar parte de estos problemas, uno de los conceptos propuestos es una estructura porosa llena de litio líquido (*Capillary Porous Structure*, CPS), donde el problema de la estabilidad del metal líquido en presencia del campo magnético se resuelve al encerrar el Li en una malla porosa en la que queda retenido debido a su elevada tensión superficial.

c) Envolturas regeneradoras basadas en metales líquidos

El litio es también muy importante, tanto puro como en su aleación litio-plomo, como componente del *blanket* de los reactores de fusión. Algunos conceptos muy prometedores propuestos para ITER y DEMO se basan en envolturas de estos metales para la regeneración de tritio dentro del reactor (Figura 7.3).

Los principales problemas que aparecen asociados a este tipo de tecnología son, entre otros:

- Los efectos magnetohidrodinámicos, que dependiendo de la velocidad del metal líquido (desde mm/s en algunos diseños, a m/s en otros) darán lugar a pérdidas de carga, inhomogeneidades del flujo en los distintos canales, reducción de la transmisión de calor, etc.
- La corrosión de los materiales en contacto con el metal líquido.
- Los fenómenos asociados a la gestión del tritio: técnicas de enriquecimiento del litio, permeación, extracción, etc.
- Los problemas derivados de la seguridad del metal líquido.

Todos estos problemas han implicado además, un gran esfuerzo en la investigación, desarrollo y validación de recubrimientos de materiales específicos anti-permeación, anti-corrosión, aislantes eléctricos, etc.

La presencia de radiación, o bien potencia, o bien añade un factor de incertidumbre a todos los problemas descritos anteriormente. Además, cabe resaltar que en general, aspectos como la difusión de gases e impurezas en el litio, se ven modificados cuando existe un campo de radiación.

Por otra parte, en cualquiera de las aplicaciones del litio en el ámbito de la fusión nuclear antes descritas, existen otro tipo de problemas generales asociados al metal líquido en sí como son: la purificación, la corrosión de los materiales en contacto con el litio y su compatibilidad con éste.

⁵³ B.I. Khripunov, "Liquid lithium surface research and development", Journal of Nuclear Materials, Volumes 313-316, March 2003

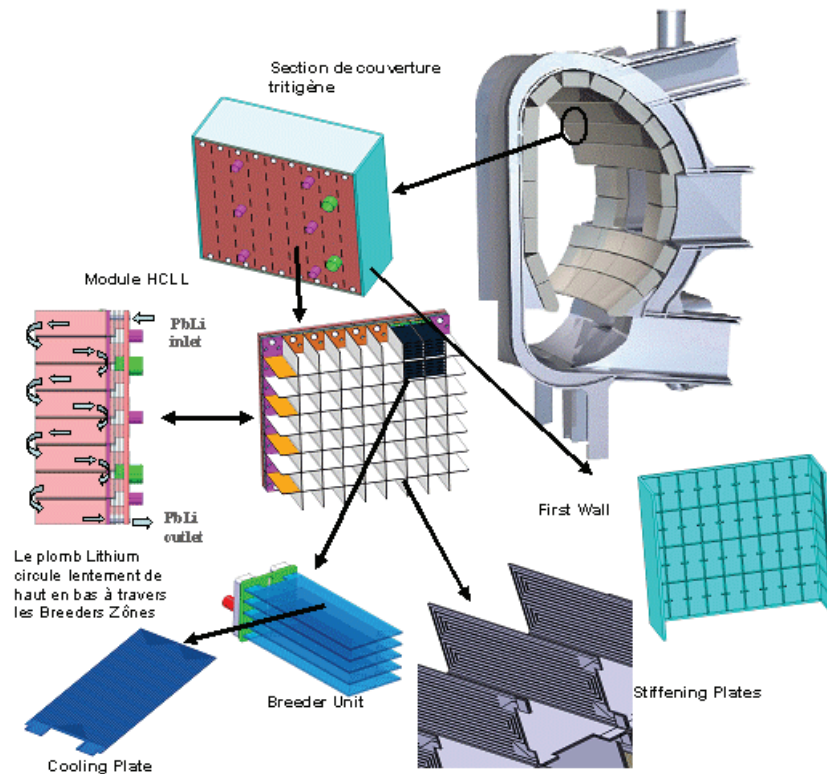


Figura 7.3. Unidad regeneradora de tritio de un *blanket* tipo HCLL (*Helium Cooled Lithium Lead*) para los *Test Blanket Modules* de ITER (fuente: CEA)

7.3.2. Instalaciones de referencia internacionales en tecnologías de litio líquido

En el mundo existen una serie de instalaciones de referencia relacionadas con la tecnología de metales líquidos en fusión. En la Tabla 7.1 se muestra el inventario de instalaciones de este tipo en función del fluido de trabajo del lazo. En dicha tabla se observa la carencia de iniciativas relacionadas con el desarrollo de la tecnología del litio, sobre todo en Europa, ámbito de influencia de la instalación propuesta en este informe.

Europa cuenta, sin embargo, con un gran número de instalaciones experimentales que utilizan Li-Pb. Así, existen varios lazos relacionados con la compatibilidad de este metal líquido con distintos materiales en Italia (LIFUS II), Alemania (PICOLO) y Letonia (Latvia LOOP). Éste último permite, además, el estudio de la corrosión con influencia de un campo magnético. Otros tipos de estudios de interés, relacionados con la difusión de gases en Li-Pb, cualificación de barreras de permeación o extracción de tritio, se llevan a cabo en instalaciones como TRIEX, VIVALDI o LEDI en Italia y MELODIE en Francia. En este país existen, además, otros lazos como PABLITO, construido para probar distintos componentes como bombas,

etc. La República Checa cuenta también con un lazo de Li-Pb (en Interacción Plasma-Pared) diseñado, entre otros, para estudios de purificación.

Tabla 7.1. Relación de instalaciones de Li y Pb17Li en el mundo.

Litio	Pb17Li
EEUU	ITALIA (ENEA)
Universidad de Illinois ORNL Sandia Argonne NL Universidad de California	LIFUS-2 LIFUS-5 TRIEX RELA III LEDI LTF-M SOLE
ITALIA (ENEA)	
LIFUS-3	
JAPÓN	FRANCIA (CEA)
NIFS Universidad de Osaka	MELODIE PABLITO DIADEMO
RUSIA	ALEMANIA (FZK)
	PICOLO
	RUSIA
	IPPE
IPPE	REPÚBLICA CHECA
	IPP
	LETONIA
	IPUL

Los estudios relacionados con la seguridad del Pb-Li, especialmente la interacción de éste con agua, se llevan a cabo en Italia en instalaciones como LIFUS5 y RELA III. Por último, existen lazos en los que se prueban prototipos de *blankets* como el lazo EBBTF en Italia y el DIADEMO en Francia en los que, además, existe un lazo de helio acoplado.

En cuanto a la investigación con litio puro en Europa, Italia cuenta con la instalación LIFUS3 (Figura 7.4.) dedicada fundamentalmente al estudio de materiales. Esta instalación tiene un inventario total de litio de 46 litros, generando un caudal de 0.5 l/s, con una velocidad en la sección de ensayo de 12-18 m/s, una presión de 2.5 bar, y una temperatura de ensayo de 350 °C.



Figura 7.4. Instalación LIFUS3 (ENEA).

En EE.UU., al contrario que en Europa, las instalaciones se dedican fundamentalmente al estudio de la tecnología del litio, y en particular a su comportamiento magnetohidrodinámico. Para este tipo de estudios existe en el Laboratorio Nacional de Sandia la instalación LIMITS (Figura 7.5.) compuesta por tres cámaras: una cámara de vacío para la observación del comportamiento del metal líquido, una cámara de bombeo y un depósito. En la cámara de vacío se realizan los ensayos en secciones de tubería de distintas formas y sometidas a un campo magnético. Las bombas que realizan el trasiego de metal líquido son de diseño especial ante la falta de suministradores comerciales.

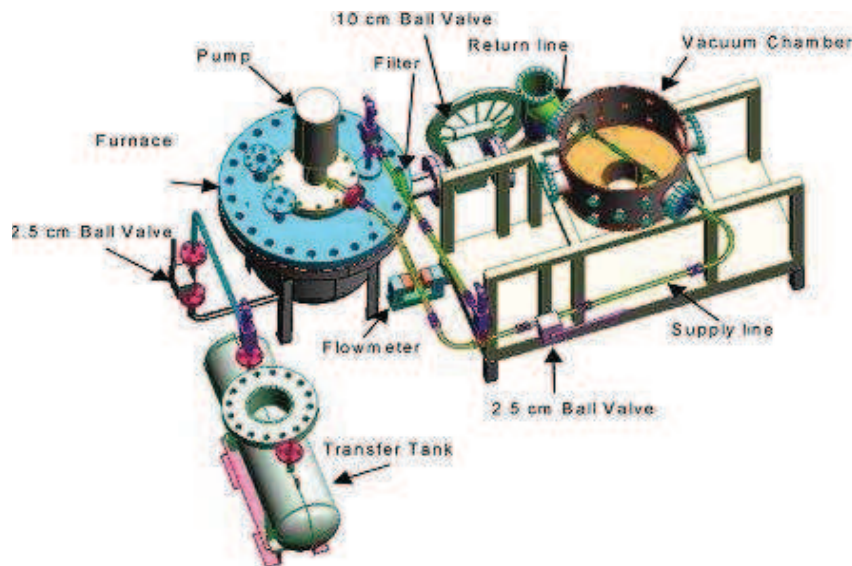


Figura 7.5. Instalación LIMITS en el Laboratorio Nacional de Sandia (EE.UU.).

También en EE.UU. se encuentra el Laboratorio de metales líquidos de la Universidad de Illinois (Figura 7.6.) en el que se llevan a cabo experimentos para el estudio de la retención de deuterio en litio líquido. Con estos ensayos se pretende obtener información de cara al diseño de una primera pared de litio líquido en contacto con el plasma de futuros reactores de fusión por confinamiento magnético.

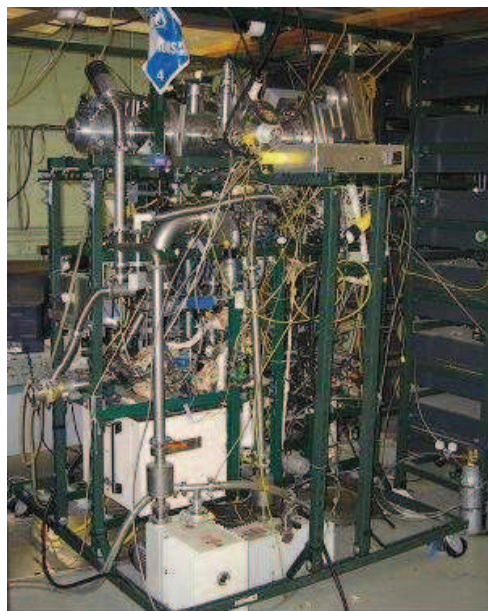


Figura 7.6. Instalación de la Universidad de Illinois (EE.UU.).

En cuanto a Japón, la Universidad de Osaka tiene una actividad muy destacable en tecnología de fusión, estudiando fenómenos como el comportamiento de la superficie libre del litio en el *target* de IFMIF⁵⁴, lo que podría servir además de apoyo técnico de cara a una propuesta de construcción de esta instalación para irradiación de materiales en Japón. Para ello se ha construido en esta universidad un circuito de litio (Figura 7.7) con una sección experimental para el ensayo con una superficie libre. El circuito tiene una longitud de 40 m y está construido con tuberías de acero 304 de 52.7 mm de diámetro. La presión en el interior del circuito es del orden de 400 kPa, con un caudal de litio de 500 l/min a 300 °C, y con un margen de seguridad bastante razonable para evitar problemas de solidificación de litio a 180 °C.

⁵⁴ H. Kondo et al. 'Experimental study of lithium free-surface flow for IFMIF target design'. Fusion Engineering and Design 81 (2006) 687-693.

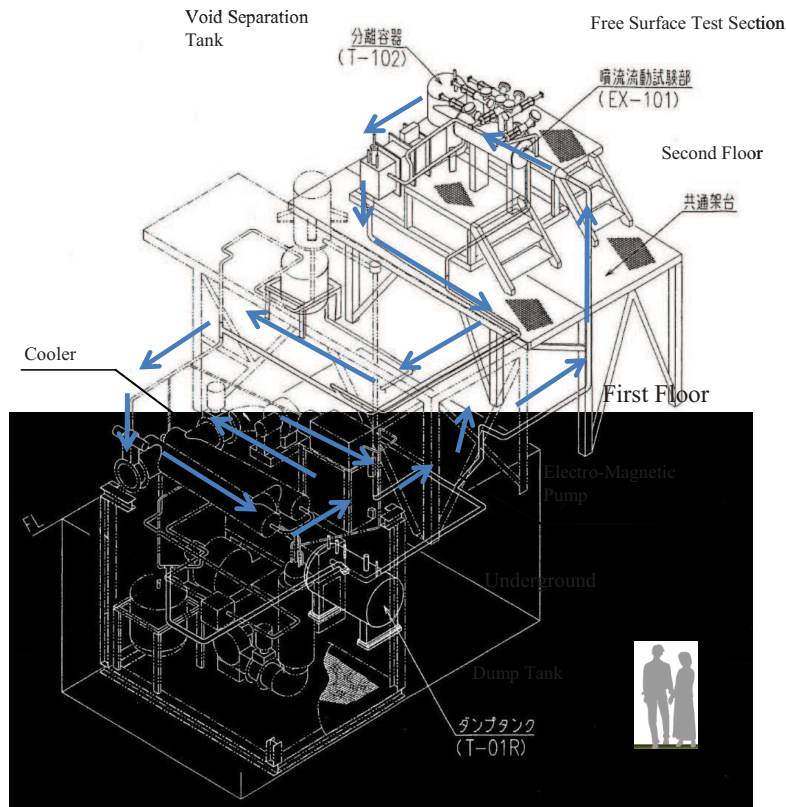


Figura 7.7. Esquema del circuito de litio para estudios de IFMIF de la Universidad de Osaka (Japón).

La sección experimental de la superficie libre de litio en Osaka se muestra en la Figura 7.8. Esta geometría es un modelo a escala 1/2.5 del diseño considerado por JAERI para IFMIF. A diferencia del *target* real de IFMIF, que presenta cierta curvatura para que la fuerza centrífuga resultante ayude a evitar la ebullición del metal líquido, la sección experimental del lazo de Osaka es recta y horizontal, como en otros experimentos dedicados a IFMIF. Por otra parte, el efecto de la curvatura de la zona experimental se ha investigado en los estudios llevados a cabo por Itoh⁵⁵ y parece despreciable de cara a la modelización del comportamiento de la superficie libre.

A esta serie de instalaciones se debe añadir la de IPPE (Figura 7.9), desarrollada en Obninsk (Rusia) al amparo de un proyecto ISTC, para el estudio de la termohidráulica de superficie libre tanto con agua como con litio, incluyendo el desarrollo de sistemas auxiliares. El valor añadido de esta instalación es precisamente su sistema de purificación con el que se controla el nivel de impurezas del litio.

⁵⁵ K. Itoh, H. Nakamura, Y. Kukita, "Free-surface shear layer instabilities on a high-speed liquid jet", Fusion Technol. 37 (2000) 74–88

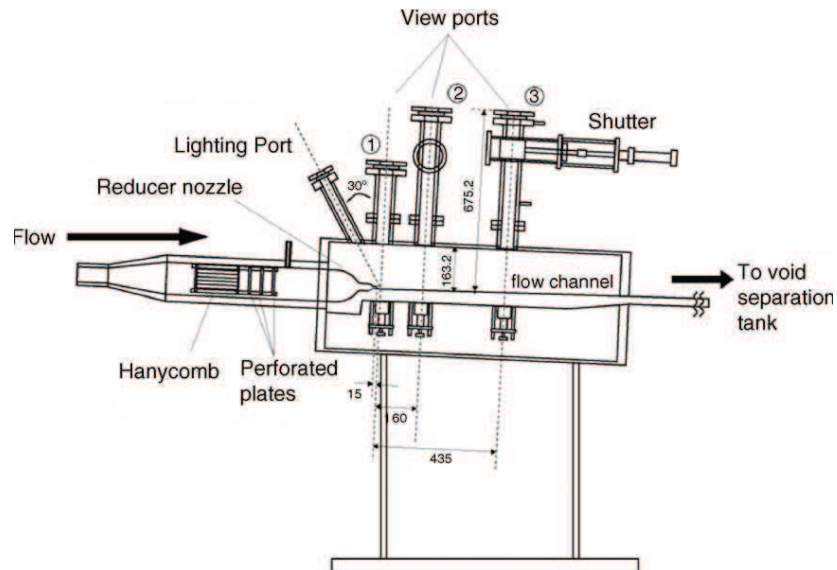


Figura 7.8. Sección experimental para superficie libre de litio en Osaka.



Figura 7.9. Instalación IPPE en Obninsk.

A diferencia de los laboratorios estadounidenses, dedicados fundamentalmente a estudios de litio líquido relacionado con futuros conceptos de reactores de fusión, las instalaciones de Italia, Rusia y Japón han realizado una importante labor para el desarrollo de IFMIF. La Figura 7.10 muestra la comparativa de las zonas de ensayo de superficie libre de estos laboratorios internacionales dedicados al estudio de IFMIF. La geometría de la zona de estudio es diferente según el caso (más ancho, estrecho, con distintas curvaturas, canal recto, etc.) y el fluido del experimento es litio en el caso de Osaka e IPPE y agua en el caso italiano, donde sólo han utilizado litio para estudios de materiales.

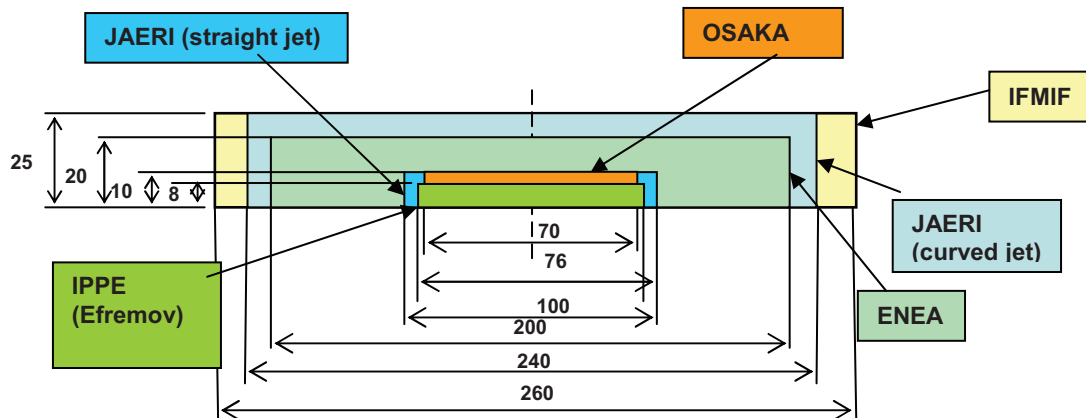


Figura 7.10. Secciones transversales de la corriente de litio en algunos experimentos que se están llevando a cabo en el mundo relacionados con IFMIF.

Como ya se ha mencionado, en ninguno de estos laboratorios se realizan experimentos en los que se deposite potencia en el litio. Además, no siempre la velocidad máxima del lazo es comparable a la esperada en IFMIF y por supuesto, el fluido de trabajo no siempre es litio.

Este pequeño análisis de la situación actual demuestra que el inventario de instalaciones relacionadas con la tecnología de litio es escaso, con lo que se hace necesario el aporte de nuevas instalaciones. En ellas podrán realizarse experimentos redundantes con los actuales para asegurar la reproducibilidad de las conclusiones obtenidas, así como obtener nuevas capacidades que permitan el desarrollo de experimentos que cubran las lagunas tecnológicas existentes, como ensayos de superficie libre sometido a una generación interna de calor, que es de enorme importancia para IFMIF y que en la actualidad no se puede llevar a cabo en ningún laboratorio del mundo. También se ha observado que la mayoría de los ensayos de materiales en contacto con litio líquido se realiza a bajas temperaturas (válido para estudios relacionados con IFMIF pero no con reactores de fusión en los que se pueden llegar a alcanzar valores del orden de los 1.000 °C). Otra de las carencias observadas se refiere al estudio acoplado de compatibilidad de materiales con metal líquido, campos electromagnéticos e incluso radiación.

El diseño del Área ATML de *TechnoFusión* pretende dar un paso adelante en la temperatura de operación para tener un rango más amplio en los datos que se pueden obtener en relación a ensayos de corrosión con litio. Además, se incluirá el acoplamiento del lazo con un acelerador de electrones que permitirá el estudio de la superficie libre de litio líquido con deposición interna de calor y ensayos de materiales bajo un campo de radiación. De este modo, se pretenden obtener ensayos relevantes tanto para IFMIF como para otras aplicaciones del metal líquido en el campo de la fusión gracias al análisis conjunto de la problemática principal.

7.4. Equipamiento previsto

El núcleo del Área de experimentación de Tecnología de Metales Líquidos de *TechnoFusión* estará constituido por distintos circuitos, en principio de litio, en los que se llevarán a cabo experimentos relevantes para la tecnología de fusión, aunque no se descarta la experimentación con el eutéctico litio-plomo.

Para la definición técnica de estos circuitos de metal líquido, se han estudiado las instalaciones internacionales de referencia y se han tomado como datos de partida las condiciones experimentales requeridas por los distintos ensayos previstos (éstas se detallan en la sección 7.5 “Capacidad experimental”). Se ha encontrado que algunos experimentos requerirán unas condiciones de operación que pueden llegar a ser incompatibles con otros, lo que ha llevado a plantear la posibilidad de instalar circuitos dedicados a experimentos específicos.

Por ejemplo, un circuito pensado para realizar ensayos de superficie libre relevantes para IFMIF, deberá contar con cierta velocidad del metal líquido ya que éste es uno de los factores más críticos para la estabilidad de la superficie libre. Además, si se quiere depositar potencia con el acelerador de electrones, ya que el acoplamiento con la línea del acelerador está a vacío, el circuito deberá tener cierta altura total para evitar la cavitación. Otro factor que influirá en el diseño del circuito es la temperatura de operación, y en este caso, se requieren en principio temperaturas del orden de 250 °C. También hay que considerar a la hora de estudiar la estrategia experimental, la duración de las campañas experimentales: los experimentos de superficie libre que se llevan a cabo en otras instalaciones se realizan en campañas de algunas semanas de duración.

Como contraposición, los ensayos de compatibilidad de materiales con metal líquido pueden requerir, en principio, menores caudales de metal líquido en circulación y dar lugar a circuitos más pequeños físicamente. Sin embargo, demandarán mayores temperaturas de operación y un sistema de extracción de calor, lo que puede complicarlo mucho más. En cuanto a las campañas experimentales, los experimentos de corrosión pueden durar algunos miles de horas de funcionamiento continuo.

Los ensayos de magnetohidrodinámica no requerirían, a priori, un gran inventario de metal líquido en circulación pero sí sería de especial interés poder variar las velocidades y también las temperaturas de operación. Además, sería interesante estudiar la influencia de la presencia de campos magnéticos en el desarrollo de otros experimentos, como los de corrosión, o los de fluidodinámica. Se puede pensar, por tanto, en acoplar unos imanes tanto al circuito donde se ensaye la fluidodinámica como al de compatibilidad de materiales, si ambos se diseñan previamente con la suficiente flexibilidad.

Del mismo modo se pueden plantear los ensayos sobre difusión de gases en el metal líquido o en los materiales en contacto con éste, relevantes para la gestión del tritio en los reactores de fusión. Estos ensayos se pueden acoplar a circuitos dedicados a otras pruebas, si se construyen adecuadamente.

Los ensayos de purificación se podrán llevar a cabo sobre los diversos sistemas de purificación instalados en los distintos circuitos, de modo que en principio no requerirían un circuito dedicado.

Los ensayos de seguridad se deberán hacer, probablemente, en un circuito independiente con poco inventario de metal líquido.

En cuanto al eutéctico litio-plomo, aunque no es la meta principal del Área ATML de *TechnoFusión*, no hay que descartar la posibilidad de efectuar algún experimento relacionado con él debido a su gran interés para la tecnología de fusión. Habrá que estudiar en detalle si es posible cambiar a litio-plomo en un circuito que ha sido diseñado y dimensionado para litio como fluido de trabajo, o si por el contrario, la experimentación con litio-plomo requiere desde el principio un circuito dedicado. En cualquier caso, ya que los ensayos con litio-plomo requieren en general bajas velocidades de trabajo (desde algunos milímetros por segundo hasta metros por segundo), se podría pensar en la instalación de un circuito básico basado en convección natural.

El análisis de los distintos experimentos que se pretenden realizar ha llevado a prever como base de esta Área de experimentación, **dos circuitos de litio líquido: uno de ellos dedicado fundamentalmente a los estudios de fluidodinámica y otro dedicado a ensayos mecánicos de materiales, corrosión y compatibilidad**. No hay que descartar que estos dos circuitos puedan compartir algún componente o sistema, como por ejemplo, los sistemas de llenado, el tanque de almacenamiento del inventario o los sistemas de purificación.

Ambos circuitos se diseñarán con la suficiente flexibilidad como para poder realizar otro tipo de ensayos. También el diseño de los espacios en infraestructuras de la instalación deberá hacerse pensando en la posibilidad de incorporar en el futuro otros pequeños circuitos o ampliar los existentes. Este planteamiento encaja con la posibilidad de una puesta en marcha escalonada del Área ATML.

La Figura 7.11 resume esquemáticamente los objetivos que debe cubrir el Área ATML, así como las condiciones experimentales específicas asociadas a cada ensayo y que han servido de datos de partida para el diseño de los circuitos. En la sección 7.5 se aportan más detalles técnicos sobre los ensayos a realizar.

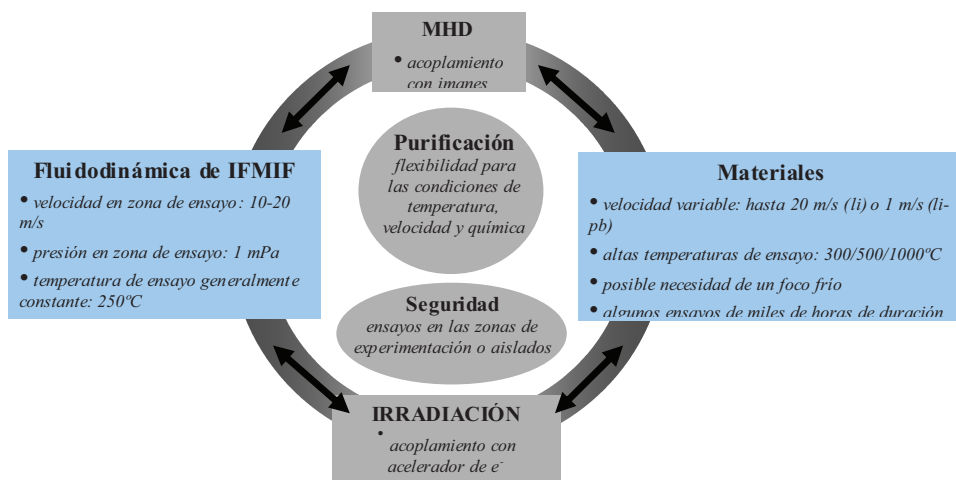


Figura 7.11. Objetivos del Área de experimentación de Tecnología de Metales Líquidos de *TechnoFusión*.

7.4.1. Definición técnica de los circuitos de litio líquido de experimentación

(I) Circuito para ensayos de superficie libre

El circuito dedicado a ensayos de superficie libre podría tener un inventario de litio de unos 500 l y constará de:

1) Componentes convencionales:

- Tuberías: dimensionadas adecuadamente para un rango de velocidades de entre 5 y 20 m/s de litio líquido.
- Bombas: capaces de impulsar un caudal de litio líquido de unos 50 m³/h máximos a la presión suficiente para evitar la cavitación en el circuito.
- Depósito de almacenamiento: con una capacidad de aproximadamente 1.000 l de litio líquido (si se prevé que va a servir también de depósito de almacenamiento del circuito de ensayo de materiales y otros posibles circuitos)
- Instrumentación de control y diagnóstico del sistema: caudalímetro, medidores de temperatura, medidores de presión, medidor de nivel en el depósito, etc.

2) Zona de ensayo, que constará de:

- Una zona de superficie libre, formada fundamentalmente por un elemento que convierta el flujo en laminar (*straightner*), una tobera de salida del litio líquido y una bandeja por la que circulará éste en superficie libre. Habrá que realizar un cálculo detallado de las dimensiones de estos componentes, de tal modo que los ensayos que se desarrollen sean relevantes para IFMIF.
- Suficientes puertos de acceso a la zona de ensayo para poder instalar la instrumentación requerida (cámaras, medidores de velocidad, etc.), permitir la entrada del haz del acelerador de electrones, y actuar de reserva para la instalación de futuros diagnósticos.
- Un tanque intermedio (*Quench tank*) para disminuir la velocidad del metal líquido a la salida de la zona de ensayo y absorber las dilataciones térmicas y fluctuaciones del fluido antes de que llegue a la bomba. También servirá de separador de los posibles gases (especialmente argón) que hayan podido quedar retenidos en el metal líquido. Este tanque podría tener una capacidad de unos 200 l.

Otros condicionantes para el diseño del circuito serán:

- a) El acoplamiento de la zona de ensayo con el acelerador de electrones impondrá unos requisitos específicos: la zona de ensayo deberá estar a vacío (atmósfera de argón a 10⁻³ Pa), debe ser viable de la conexión física de ambos sistemas (acelerador-circuito de litio), blindajes, etc.

- b) La zona de ensayo de superficie libre deberá poder ser extraíble, para poder instalar distintas geometrías y/o tamaños y/o materiales de los componentes que la constituyen.
- c) Se deberán implementar los mecanismos adecuados para poder variar velocidad del metal líquido en la zona de ensayo (hasta 20 m/s), por ejemplo, mediante la instalación de válvulas de regulación de caudal.
- d) Deberá considerarse la posibilidad de realizar en algunos tramos del circuito otro tipo de experimentos como:
 - Magnetohidrodinámica: previendo el espacio necesario para instalar imanes.
 - Difusión de gases: mediante la instalación de puertos de acceso de reserva en el circuito conectados a líneas de gas adicionales.
 - Etc.
- e) Otro factor que habrá que tener en cuenta es que una de las actividades primordiales del Área ATML de *TechnoFusión* estará enfocada a la validación de herramientas computacionales de diseño de componentes y sistemas que trabajen con metales líquidos. Por tanto, los circuitos deberán estar abundantemente diagnosticados de modo que las lecturas de la instrumentación proporcionen datos suficientes para la validación, en la medida de lo posible.

(II) Circuito para ensayos de materiales

Los materiales en contacto con litio líquido trabajan en la tecnología de fusión a unas temperaturas desde los 300 °C, con unas velocidades relativamente altas en el caso de los componentes del lazo de litio de IFMIF, hasta los 1.000 °C de temperatura en el caso de algunos *blankets* avanzados con una velocidad del metal líquido relativamente baja. El circuito de ensayo de materiales deberá, por tanto, estar diseñado con la suficiente flexibilidad como para acometer experimentos con esas condiciones extremas.

En concreto, este circuito, que podría tener un inventario de litio de unos 200 l, contará con los siguientes componentes:

1) Componentes convencionales:

- Tuberías, valvulería, bomba impulsoras, instrumentación de control y diagnóstico del circuito, etc.
- Este circuito podría compartir con el de fluidodinámica el depósito de almacenamiento del inventario.
- También los sistemas de purificación podrían también ser compartidos.

- Debido a que se pretenden realizar algunos ensayos a temperaturas bastante elevadas, será necesario instalar un sistema de extracción de calor basado, por ejemplo, en un circuito intermedio de aceite, con un intercambiador litio-aceite, y un circuito de agua con un intercambiador aceite-agua y una unidad enfriadora como sumidero final de calor.

2) Zonas de ensayo:

- La zona de ensayo de corrosión y compatibilidad de materiales podría consistir en un tramo de tubería en el que se inserten las muestras de los materiales a analizar.
- La zona que se dedique a ensayos mecánicos deberá estar diseñada de modo que sea posible el acoplamiento con las máquinas de ensayo.
- La selección de los materiales de las tuberías y resto de componentes del circuito deberá considerar los ensayos a temperaturas elevadas.

Otros condicionantes para el diseño del circuito serán:

- a) El acoplamiento con el acelerador de electrones permitirá la realización de ensayos en este circuito bajo un campo de radiación *gamma*, que se producirá al hacer incidir el haz de electrones sobre una placa de material adecuado en las proximidades del componente a ensayar. Esto impondrá unos requisitos de diseño específicos al circuito de ensayo de materiales, en cuanto a su ubicación, blindajes, etc. Además, entre la instrumentación a instalar habrá que prever medidores de radiación.
- b) Los ensayos a altas temperaturas impondrán un fuerte condicionante para la elección de los materiales del circuito.
- c) Las zonas de ensayo deberán estar diseñadas de tal modo que puedan desmontarse con facilidad para poder instalar distintas geometrías y/o tamaños y materiales.
- d) Se deberán implementar los mecanismos adecuados para poder variar la velocidad del metal líquido en la zona de ensayo (desde algunos mm/s hasta 20 m/s), por ejemplo, mediante la instalación de válvulas de regulación de caudal.
- e) Deberá considerarse la posibilidad de realizar en algunos tramos del circuito, otro tipo de experimentos, como:
 - Magnetohidrodinámica: previendo el espacio necesario para instalar imanes.
 - Difusión de gases: mediante la instalación de puertos de acceso de reserva en el circuito conectados con líneas de gas adicionales.
 - Etc.

(III) Sistemas auxiliares

- 1) Resistencias eléctricas: todos los equipos y componentes irán calefactados mediante resistencias eléctricas y aislados térmicamente. El control de la temperatura del circuito se efectuará mediante el número adecuado de termopares.
- 2) Sistema/s de vacío, incluyendo trampas de vapor, conectados con los diferentes depósitos y con la zona de ensayo de superficie libre
- 3) Sistema de suministro de argon, conectado también con los diferentes depósitos y con la zona de ensayo de superficie libre.
- 4) Sistema de suministro de aire comprimido para actuación de válvulas neumáticas u otros componentes
- 5) Sistema de alimentación eléctrica que suministrará la potencia requerida por la bomba, los calentadores eléctricos, los sistemas de vacío, y resto de componentes activos. Se espera un consumo eléctrico de unos 300 kW.
- 6) Sistema de control (por ejemplo, basado en autómatas programables) que recogerá y procesará las señales de la instrumentación y operará, mediante una interfaz con el usuario, los componentes activos de la instalación
- 7) Sistema de llenado en el caso de que el litio de origen se encuentre en forma de lingotes. En este caso los lingotes se funden primero en un tanque independiente, calefactado y dedicado a tal efecto. El litio ya líquido se trasvasa al circuito conectando este primer tanque e inyectando argon (lazo de la Universidad de Osaka). En otros casos (lazo de IPPE) hay un paso intermedio en otro tanque de almacenamiento en el que se llevan a cabo algunas operaciones de eliminación de impurezas. Por lo tanto, habrá que dejar en la instalación el espacio suficiente para albergar dichos tanques de llenado.
- 8) Sistemas de purificación y monitorización de impurezas. Habrá que estudiar en detalle la posibilidad de instalar un sistema de purificación común para los circuitos de superficie libre y ensayo de materiales o por el contrario, cada circuito debería tener el suyo propio. Debido a la gran importancia de estos sistemas, que pueden constituir un objetivo experimental en sí mismos, se les ha dedicado una atención especial al final de esta sección.

(IV) Consideraciones sobre los materiales de la instalación

Los metales líquidos, dan lugar a procesos de corrosión relativamente intensos que inducen a un deterioro progresivo del material que constituye las tuberías del sistema. Lógicamente, será necesario dimensionarlas de forma que durante toda la vida útil de la instalación su operación resulte segura. Para ello se supondrá un tiempo de vida útil de la instalación de 20 años.

La velocidad de corrosión estará directamente relacionada con la temperatura de trabajo del sistema. Tal como se ha comentado anteriormente, los estudios de superficie libre se realizarán a una temperatura de 250 °C, mientras que los estudios de materiales se podrán realizar a distintas temperaturas, incluso a muy altas. Dado que el circuito de baja temperatura también se podría utilizar en experimentos distintos a los de superficie libre con temperaturas superiores, las tuberías estarán dimensionadas para soportar ratios de corrosión similares a los parámetros de diseño del lazo de alta temperatura. Como valor de referencia se utilizará una temperatura de 500 °C. Se podrían ensayar temperaturas mayores, pero esto supondría tener que utilizar materiales o aceros especiales para la constitución del lazo completo. En el caso de ensayar temperaturas mayores, el propio diseño del experimento que se acople al lazo debe estar diseñado para no someter al circuito principal a temperaturas mayores de 500 °C mediante los sistemas que estime oportuno de refrigeración/calefacción local.

Utilizando los valores representados en las Figura 7.12 y suponiendo que la temperatura de operación son 500 °C durante 8.760 h/año, se obtienen los valores de corrosión presentados en la Tabla 7.2.

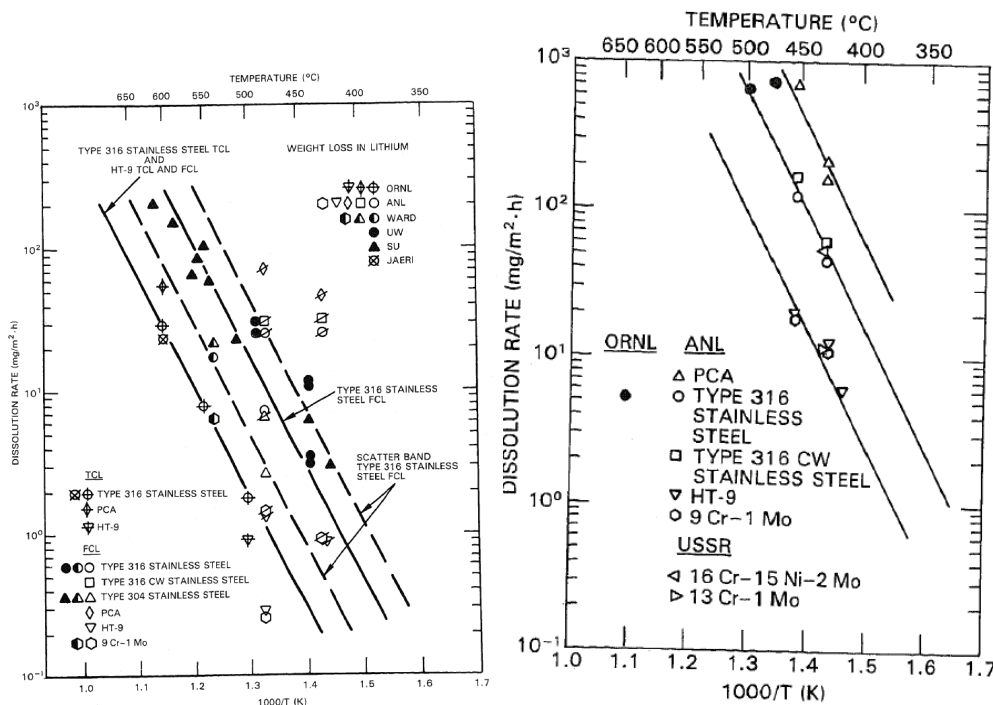


Figura 7.12. (izquierda) Relación de corrosión para aceros inoxidables austeníticos 304 y 316 y aleaciones ferríticas PCA, HT-9, Fe-9Cr-1Mo. Exposición a una corriente de litio con una velocidad de 1.4m/s.(derecha) Ratios de corrosión para aceros inoxidables austeníticos del tipo 316 y aleaciones ferríticas HT-9 y Fe-9Cr-1Mo. Exposición a una corriente de plomo-litio con una velocidad de 1.5 m/s.

Tabla 7.2 Estimación de tasas de corrosión.

	Acero HT-9	Acero 316 SS
Li (mg /m ² -h)	1.43	12.9
Pb-Li (mg /m ² -h)	66.4	540
Densidad Li (Kg/m ³)	25.,75	-
Densidad Pb-Li (Kg/m ³)	10436.99	-
Corrosión Li (µm/año)	49.17	443.58
Corrosión Pb-Li (µm/año)	55.73	453.23
Corrosión Li 20 años (µm)	983.44	8871.59
Corrosión Pb 20 años (µm)	1114.62	9064.68

En cuanto a los aceros a utilizar, pueden descartarse sin ningún tipo de duda los aceros austeníticos inoxidable, dado que las tasas de corrosión a lo largo de la vida de la instalación superan con creces el espesor del conducto. Con objeto de evitar la sustitución de las tuberías, se ha pensado utilizar aceros de base ferrítica HT-9 ó 9Cr-1Mo.

Suponiendo la utilización de aceros de base ferrítica, la corrosión a lo largo de los 20 años de operación de la instalación supone una disminución de 1 mm en el espesor de la tubería.

(V) Tratamiento de impurezas

Uno de los aspectos más importantes relacionados con el funcionamiento práctico de un flujo de metal líquido sometido a la radiación procedente del acelerador de electrones, será el nivel de pureza del fluido a estudiar. El acoplamiento del lazo con el acelerador ha de hacerse a través de un conducto a vacío para minimizar el transporte de impurezas desde las últimas secciones del acelerador. La deposición de energía en el metal líquido y las elevadas temperaturas a las que se realizarán algunos experimentos, darán lugar a la liberación en forma gaseosa de algunas impurezas que pueda contener el fluido y que podrían afectar a la línea de transporte de partículas.

En el caso de los experimentos sin superficie libre, la relevancia de estos fenómenos es menor, aunque pueden afectar al funcionamiento del sistema de impulsión de metal líquido. La presencia de estas impurezas daría lugar a puntos de nucleación de vapores de litio que hace que este fenómeno pueda ser importante a nivel local.

Por otra parte, el movimiento del litio a lo largo del lazo provoca también una aportación global de impurezas como consecuencia de los fenómenos de corrosión y erosión.

En resumen, las impurezas en el lazo de litio puede proceder de diferentes orígenes como:

- Impurezas del litio proporcionado por el distribuidor.
- Impurezas por difusión de los materiales estructurales y las superficies por donde circula el metal líquido.
- Impurezas debidas al gas inerte que se pueda utilizar por los medios de protección de oxidación por parte del litio.
- Impurezas procedentes de la corrosión de los materiales estructurales.
- Impurezas que penetran en el circuito por las tareas de mantenimiento y sistemas auxiliares.

Entre los elementos que se han de vigilar con especial atención en el interior del circuito de litio y que aparecen como consecuencia de los fenómenos descritos se encuentran:

- *Oxígeno*: este gas forma óxido de litio estable, por lo que se puede considerar que tiene un efecto neutro, incluso protector de la corrosión en muchos materiales como aceros, metales refractarios y algunas aleaciones. Sin embargo, la presencia de algunas impurezas, como calcio o berilio, provoca su desoxidación, y la posible formación de óxidos sólidos en la corriente de metal líquido que puede causar erosión de los materiales estructurales. La concentración de oxígeno en litio no debe superar la de saturación (por ejemplo, 30 ppm a 250 °C).
- *Nitrógeno*: es una de las impurezas con mayor solubilidad en litio. Este gas en litio puede formar nitratos de litio y nitratos completos con los componentes estructurales del acero incluso a baja temperatura. Se puede considerar que es la impureza más activa desde el punto de vista de la corrosión y en algunos estudios ⁵⁶ se limita su concentración en 100 ppm a 500 °C. Uno de los sistemas de tratamiento de impurezas más importantes es la trampa de purificación de nitrógeno.

Por todo lo anteriormente expuesto, los circuitos de metal líquido del Área ATML de *TechnoFusión* habrán de contar con uno (o varios) sistemas de tratamiento de impurezas que en sí mismo también presenta algunos aspectos de carácter experimental, sobre todo en cuanto a eficiencias de purificación y el tipo de impureza que se requiera extraer. El sistema de purificación integral propuesto estaría compuesto por tres secciones que son:

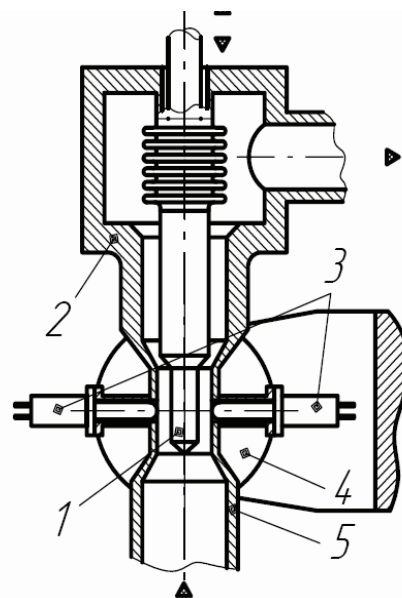
- *Sistema de extracción de oxígeno e hidrógeno*. La extracción de estos gases se realiza con trampas frías (*cold traps*), mediante discos de difusión hasta una temperatura del orden de 190 °C. Para el caso del oxígeno, se logra una concentración de saturación a esa temperatura del orden de 5.5 ppm. En el caso del hidrógeno la concentración de este gas en el litio no supera las 50 ppm.

⁵⁶ Subbotin V. et al. Lithium. – M.:IzdAt, 1999. C.263.

- *Sistema de extracción de nitrógeno.* El sistema de extracción de nitrógeno está formado por un captador de aluminio. Este procedimiento se pueden realizar a temperaturas moderadas. Mediante este método se puede conseguir concentraciones finales de 1.6 - 6 ppm. El sistema de purificación da lugar a nitratos de aluminio que se sedimentan manteniendo la corriente purificada en un depósito a 200 - 250 °C, evitando su entrada en el circuito principal mediante filtros.
- *Sistema de separación de partículas sólidas.*

(VI) Sistemas de monitorización de impurezas

Para asegurarse de que el metal líquido de la instalación está en las condiciones de pureza exigidas para una operación satisfactoria es necesario, no sólo establecer mecanismos de depuración si no también ser capaces de evaluar la concentración de las principales impurezas que pueda contener. Para lograr ese objetivo, se ha de contar con la instrumentación adecuada y se ha de prever su implementación en el diseño de la instalación experimental. Sería deseable contar con un sistema de análisis de impurezas que pueda adaptarse con facilidad a un cambio de fluido de trabajo, o incluso a una adaptación del sistema de purificación si fuera necesario (Figura 7.13). No obstante, como se ha comentado, la prioridad del Área ATML de *TechnoFusión* se centra en la operación con litio.



1 - rod, 2 - case, 3 - thermocouples, 4 - flow rate, 5 - pipeline

Figura 7.13. Dispositivo de medida de impurezas mediante análisis de temperatura de saturación.

En función del tipo de impureza se han desarrollado diferentes métodos de análisis:

- 1) *Sistema de detección de impurezas mediante la determinación de su temperatura de saturación* para el caso de impurezas no metálicas (nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y carbono). El método se basa en hacer pasar una parte del flujo del lazo de metal líquido por un canal estrecho que se encuentra refrigerado en continuo para reducir su temperatura de forma controlada mediante un flujo de agua fría. El enfriamiento del metal líquido hace que se llegue a la temperatura de saturación de las impurezas, provocando su decantación y una reducción del flujo de metal líquido que lo atraviesa por efecto del taponamiento que eso produce. Este método permite conocer el nivel de impurezas de estos elementos en tiempo real. En función de la temperatura de saturación a la que se detecta la reducción del flujo, se obtiene la concentración de las impurezas mediante las leyes que indican la relación entre ellas (ecuaciones 7.1):

$$\begin{aligned}\log[H] &= 6,68 - \frac{2308}{T} \\ \log[O] &= 6,99 - \frac{2896}{T} \\ \log[N] &= 7,57 - \frac{2080}{T}\end{aligned}\quad \text{ec.7.1.}$$

- 2) *Sistemas de detección mediante destilación de muestras de metal líquido* para el caso del oxígeno tal y como se hace en algunos reactores basados en esta tecnología, como el BN-600.
- 3) *Sistema de toma de muestras* para completar su análisis en el Área de Técnicas de Caracterización de *TechnoFusión*. Este proceso se realizaría habilitando un *by-pass* en el circuito por el que se deja fluir metal líquido hasta que se estabiliza el flujo. Una vez estabilizado, se cierran las válvulas de paso y se deja enfriar para extraerlo del lazo y transportarlo al Área Técnicas de Caracterización.

7.5. Capacidad experimental

Existen posibles líneas de investigación abordables con una instalación como la del Área ATML de *TechnoFusión* entre las que se pueden incluir desarrollos tecnológicos horizontales, comunes a cualquier instalación de metales líquidos y desarrollos verticales, referidos a aspectos concretos y específicos para una aplicación particular, como puede ser la fuente de neutrones de IFMIF:

(a) *Desarrollos tecnológicos horizontales:*

- Estudios de corrosión de materiales y de compatibilidad con metales líquidos (de interés tanto para aplicaciones de *blankets* como para IFMIF).

- Evaluación de la transferencia de calor.
- Desarrollo de sistemas auxiliares.
- Desarrollo de diagnósticos.
- Purificación de metales líquidos.
- Seguridad.

(b) *Desarrollos tecnológicos verticales:*

- Estudios de comportamiento del metal líquido en un campo magnético (magnetohidrodinámica). Desarrollo de coberturas aislantes.
- Difusión de gases, especialmente hidrógeno.
- Estudios de flujo con superficie libre con y sin deposición energética.
- Estudios específicos de comportamiento de materiales en condiciones extremas de temperatura y en contacto con metal líquido.
- Estudios específicos de materiales bañados por metal líquido, sometidos a tensión y a deposición energética.

Los posibles y principales experimentos que se llevarán a cabo en el Área ATML de *TechnoFusión* se detallan a continuación:

7.5.1. Estudios de flujo con superficie libre

Los ensayos de superficie libre con acoplamiento del acelerador de electrones estarán, como se ha comentado, dedicados fundamentalmente a IFMIF y llenarán un vacío experimental clave para el diseño de esta fuente de neutrones.

Las Figuras 7.14 y 7.15 muestran configuraciones de zonas de ensayo de distintas instalaciones internacionales y pueden dar una idea del aspecto que tendría la zona de ensayo de superficie libre de *TechnoFusión*. La idea es que el chorro de litio tenga una sección transversal de tamaño medio (del orden de 70 mm x10 mm), con velocidades de litio suficientemente altas (hasta 15 ó 20 m/s) de manera que se necesitarán unos 40 m³/h de fluido.

Los experimentos que se llevarán a cabo consistirán en la medida de las ondas superficiales (transversales y longitudinales), la posible variación del espesor de la corriente, los campos de velocidades y presiones, etc. La flexibilidad de esta zona experimental es condición fundamental para poder estudiar diferentes tipos de geometrías ya que se ha visto que la geometría, tanto de la tobera como de la bandeja, afecta directamente a la posible aparición de inestabilidades superficiales en el litio. También se estudiará cómo todos esos parámetros dependen de la velocidad del metal líquido. Se simularán procesos de erosión en la tobera de salida (roturas,

dientes de sierra, depósitos de material, etc.), deformaciones o desalineamientos en el montaje de los distintos componentes, para estudiar la influencia de estos fenómenos en la aparición y desarrollo de inestabilidades

Estos experimentos se realizaran a temperaturas relativamente bajas de unos 250 °C.

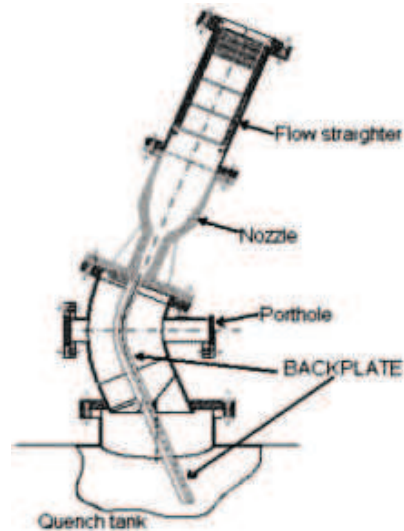


Figura 7.14. Configuración experimental para estudios relacionados con superficie libre de litio.



Figura 7.15. Puerto de ensayo de superficie libre del proyecto ISTC 2036 para ensayos con agua⁵⁷.

⁵⁷ Final Report on R&D activities on #2036 project. "The thermal-hydraulic and technological investigations for validation of the project of lithium circulation loop and neutron lithium target for IFMIF", Obninsk 2006.

Por otra parte, se estudiará la problemática asociada a la deposición de calor en el seno del metal líquido. En el *target* de litio líquido de IFMIF es el haz de deuterones el que se hace incidir sobre la corriente libre de litio para producir los neutrones el que produce un depósito como el que muestra la Figura 7.16. Sin embargo, en la instalación de *TechnoFusión*, este depósito de calor se obtendrá mediante el haz de electrones del acelerador Rhodotron. Se han realizado algunos cálculos preliminares con MCNPX y con códigos fluidodinámicos como FLUENT y CFX que demuestran que con un acelerador de electrones de 1 MeV de energía, 70 mA de intensidad y una gran focalización del haz, se pueden obtener perfiles de temperatura y densidades de potencia, aunque locales, del orden de magnitud a los esperados en IFMIF. La Figura 7.17 en particular, muestra el depósito energético que resultaría debido a haces de electrones de distintas energías.

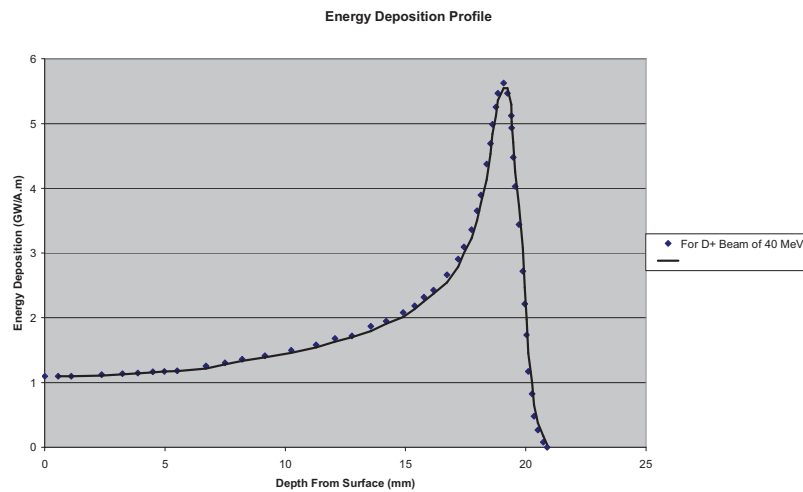


Figura 7.16. Depósito de energía en el *target* de IFMIF⁵⁸.

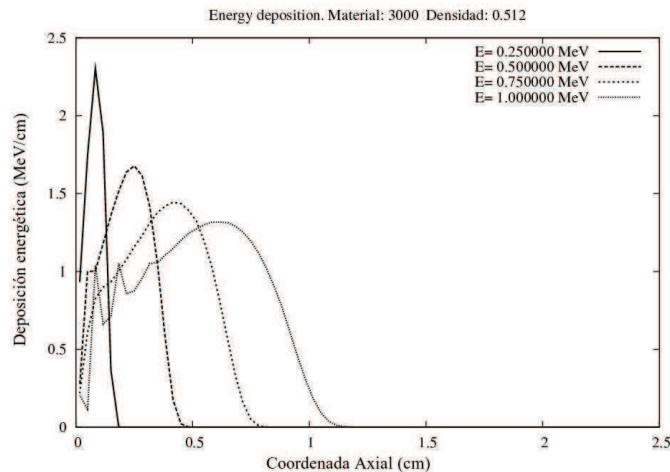


Figura 7.17. Depósito de energía producido por electrones en litio.

⁵⁸ M. Ida, Hideo Nakamura, Hiroshi Nakamura, Hiroo Nakamura, K. Ezato, H. Takeuchi, "Thermal-hydraulic characteristics of IFMIF liquid lithium target" Fusion Engineering and Design 63-64, p.333-342, 2002

Otros aspectos muy interesantes para investigar en este circuito serán los relacionados con su operación bajo condiciones de vacío, necesarios por otra parte en el caso de acoplarse con el acelerador. La operación de los circuitos experimentales en las condiciones nominales del circuito de litio de IFMIF ha supuesto grandes problemas tecnológicos en las instalaciones internacionales que lo han intentado, ya que puede aparecer cavitación en distintos puntos del circuito. Debido a esto, la consecución de las condiciones experimentales óptimas será en sí misma un reto tecnológico a alcanzar.

El circuito de ensayos de fluidodinámica de *TechnoFusión* también será válido para el estudio de paredes líquidas para reactores de fusión de manera que, sustituyendo el experimento dedicado a IFMIF, puedan instalarse prototipos de divertor (Figura 7.18), primera pared, etc. Así, podrán realizarse estudios de composición de superficies libres, estabilidad, depósito de potencia, etc.

Por otra parte, puesto que los componentes de los reactores de fusión estarán sometidos a campos electromagnéticos, esta zona tendrá un diseño tal que se permita el acoplamiento con un imán de alto campo. Aquí será de especial interés explorar nuevos conceptos en torno al metal líquido que consiste en una estructura porosa llena de litio líquido (CPS, Figura 7.19), donde el problema de la estabilidad del metal líquido en presencia del campo magnético se minimiza al encerrar el Li en una malla porosa en la queda retenido debido a su elevada tensión superficial.

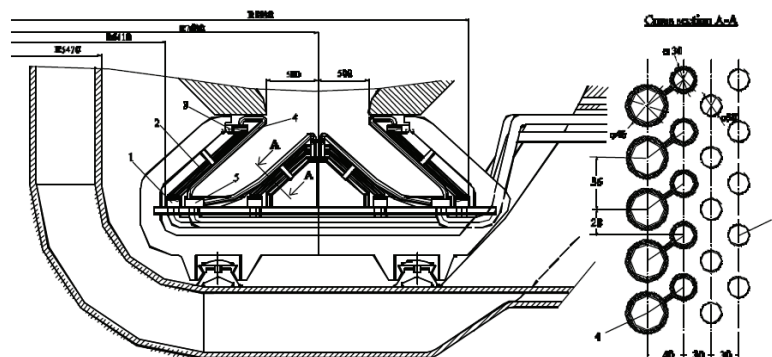


FIG.1. Lithium divertor section design option:
1-input collector, 2-channels of condensation zone, 3-intermediate collector, 4-channels of evaporation zone, 5-output collector.

Figura 7.18. Esquema de un divertor de litio líquido⁵⁹.

⁵⁹ H. Kondo et al. 'Experimental study of lithium free-surface flow for IFMIF target design'. Fusion Engineering and Design 81 (2006) 687-693

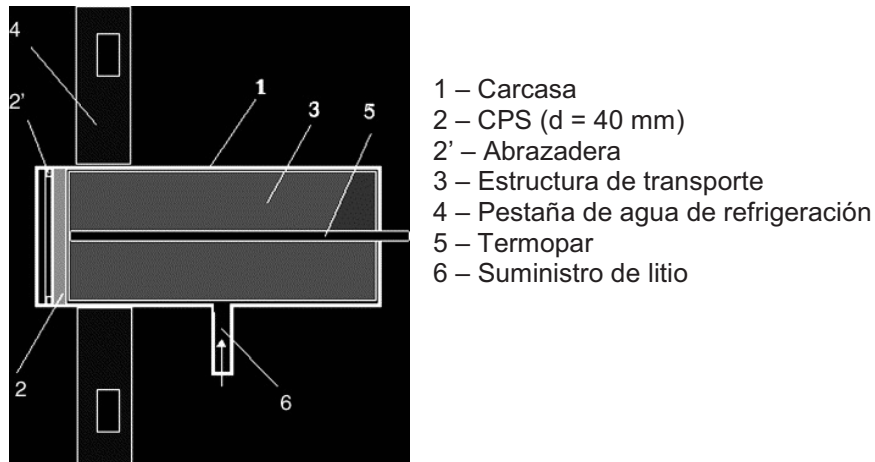


Figura 7.19. Target de litio con la tecnología CPS.

Es necesario resaltar que cada experimento concreto llevará asociada su propia instrumentación que, a su vez será objeto de estudio. Así, se instalarán, por ejemplo, detectores de ondas superficiales, láseres para la obtención de perfiles de velocidad, medidores de cavitación, evaporación, cámaras de alta velocidad, etc.

7.5.2. Ensayos de materiales

En la zona de ensayo de materiales del Área ATML de *TechnoFusión* se realizarán ensayos de compatibilidad, corrosión, difusión de gases a través de distintos materiales, propiedades mecánicas de materiales bajo ciclos de fatiga, con litio fluyente en contacto con los distintos materiales de interés para la fusión (aceros ferrítico-martensíticos, EUROFER, materiales cerámicos, grafito, etc.) y bajo condiciones relevantes según su aplicación en fusión.

Las condiciones de experimentación dependerán del objeto del análisis. Por ejemplo, para ensayos relacionados con materiales para IFMIF los experimentos se realizarán a altas velocidades (hasta 20 m/s) y bajas temperaturas (hasta 300 °C) mientras que para ensayos relacionados con materiales para máquinas de fusión las temperaturas llegarán a ser muy altas (del orden de 1.000 °C), y bajas velocidades (del orden de m/s). Para los experimentos de difusión de gases (Figura 7.20), el circuito contará con la conexión a las líneas de gas (hidrógeno, deuterio, etc.) necesarias para cada experimento. Para la realización de ensayos bajo fatiga se instalarán las máquinas de carga necesarias.

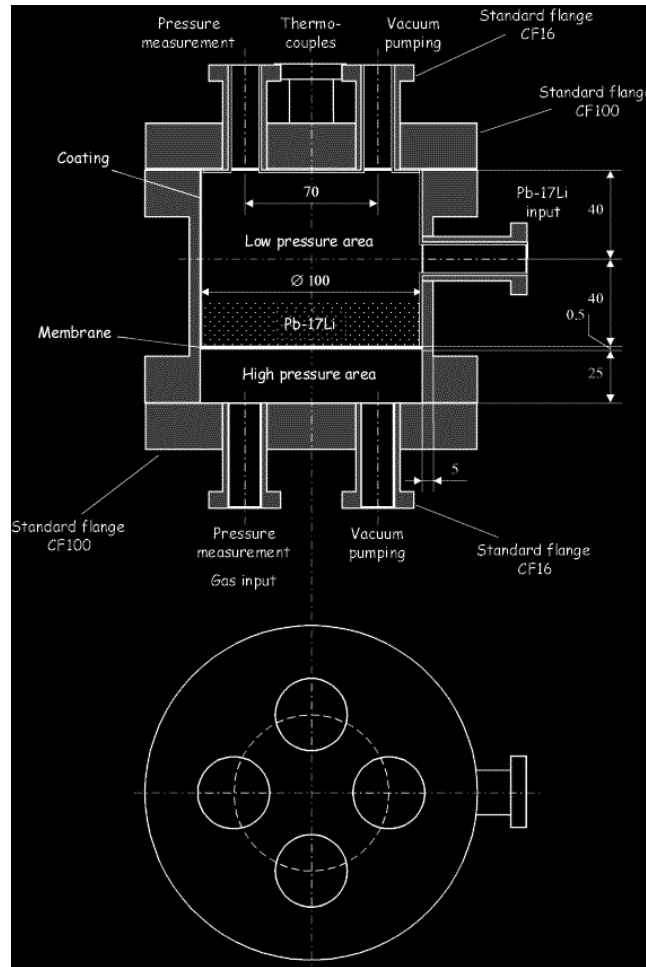


Figura 7.20. Sección experimental de la instalación LEDI para el estudio de difusión de gases en membranas en contacto con Pb-Li.

Puesto que la mayoría de los tipos de interacción del litio con otros materiales se ven influidos por la presencia de un campo de irradiación, los experimentos se realizarán, como ya se ha comentado, con y sin radiación. Los electrones se harán incidir sobre una placa de cierto material para generar el campo de radiación con el que se irradiará el objeto de ensayo. En la Figura 7.21 se muestra un esquema de un experimento de materiales con irradiación. Se trata del experimento LiSoR (*Paul Scherrer Institut*, Suiza) en el que se estudia el comportamiento de materiales en contacto con la aleación plomo-bismuto con irradiación de protones.

Los tiempos de ensayo en esta zona experimental serán, en ocasiones, bastante largos (miles de horas). Además se pretende realizar estos experimentos variando parámetros clave como la velocidad, la temperatura y la química del litio.

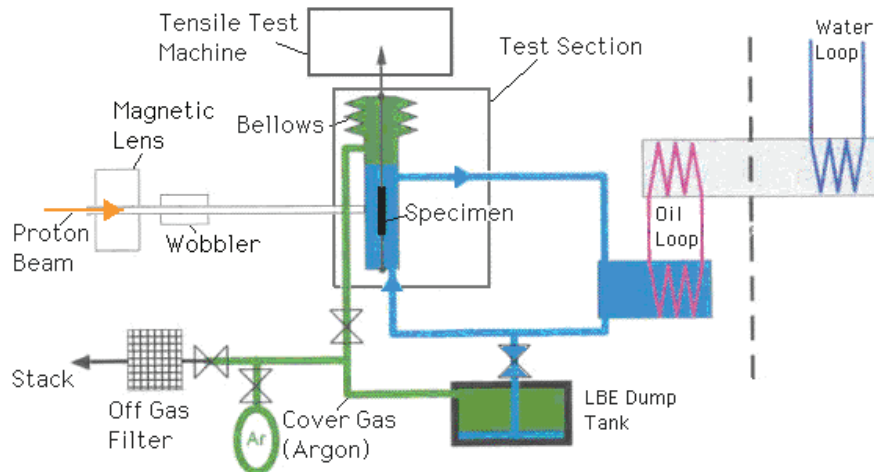


Figura 7.21. Instalación experimental LISoR del *Paul Scherrer Institut* (Suiza).

7.5.3. Ensayos de Magneto-Hidrodinámica

Puesto que los reactores de fusión estarán sometidos a campos electromagnéticos, los estudios de corrosión, transferencia de calor o incluso comportamiento fluidodinámico del metal líquido en prototipos es de gran interés en este campo. Debido a esto, en ambas zonas de experimentación de *TechnoFusión* está prevista la incorporación de imanes de alto campo.

En apartados anteriores ya se comentó la posibilidad de acoplar un imán a la zona de experimentación de superficie libre para el estudio de su estabilidad bajo la influencia de campos electromagnéticos. Por lo que respecta a los ensayos que se llevan a cabo en el circuito de materiales, la idea consiste en el estudio de la influencia de los campos electromagnéticos en las caídas de presión, perfiles de velocidad, transferencia de calor, difusión de gases, impurezas o influencia en la corrosión, entre otros. Para llevar a cabo este tipo de experimentos habría que acoplar el imán al circuito de ensayos de materiales definido anteriormente. Además, este circuito deberá contar con la posibilidad de variar la velocidad y temperatura del litio en los rangos que, presumiblemente, tendrán los futuros *blankets* de litio líquido.

Por ejemplo, para ensayos de corrosión las muestras se introducirían en contacto con el metal líquido, se acoplaría el imán que deformará el campo de velocidades y se esperará el tiempo requerido que, en general, será del orden de miles de horas. Para el resto de ensayos, los tiempos necesarios serán significativamente menores.

La Figura 7.22 muestra un esquema de una instalación para ensayos de MHD. En el caso de ensayos de transferencia de calor con campo electromagnético, se requerirán sistemas de calentamiento y enfriamiento e instrumentación para controlar la temperatura del circuito. Si lo que se desea medir son las caídas de presión

causadas por los campos electromagnéticos, el circuito deberá estar provisto de medidores de presión.

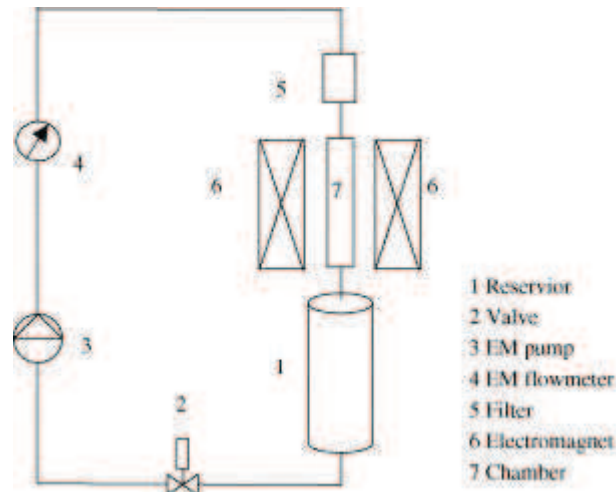


Figura 7.22. Esquema de una zona de experimentación MHD .⁶⁰

Resumiendo, para tener en cuenta este tipo de ensayos los requisitos de la zona de experimentación serán los propios de cada ensayo con las siguientes consideraciones:

- 1) Es necesario el espacio suficiente para poder instalar el imán de alto campo magnético y sus sistemas auxiliares sin que lo reste para el gran número de diagnósticos previstos.
- 2) Puesto que, en los ensayos MHD la geometría del canal es muy importante, es necesaria una cierta flexibilidad del lazo de ensayos de materiales que permita la intercambiabilidad de la parte de circuito objeto de estudio. Por ejemplo, canal circular, canal cuadrado, con estrechamiento, con canales paralelos, etc.

7.5.4. Ensayos de purificación y tratamiento de gases

Después de que el litio pase por las zonas de ensayo éste se llenará de productos de corrosión, otras impurezas sólidas o gaseosas, etc. Por otro lado, la adición deliberada de impurezas al circuito puede formar parte de alguno de los experimentos de materiales previstos. De esta manera, el lazo de litio deberá contar, necesariamente, con los equipos de purificación necesarios para que el litio entre al circuito con el grado de pureza óptimo. Además de su misión lógica, estos equipos

⁶⁰ M. Ida, Hideo Nakamura, Hiroshi Nakamura, Hiroo Nakamura, K. Ezato, H. Takeuchi, "Thermal-hydraulic characteristics of IFMIF liquid lithium target" Fusion Engineering and Design 63-64, p.333-342, 2002

pueden constituir una zona de experimentación en sí mismos, contribuyendo al desarrollo de mejores o innovadores componentes.

En principio, el sistema de purificación constará de un primer sistema que eliminaría los gases disueltos en el litio (resultado de reacciones químicas, o bien añadidos artificialmente en algún experimento) y de un segundo sistema para eliminar los productos de corrosión generados. Así, el sistema de purificación que permitirá la adecuada realización de los experimentos llevará inyectores de “capturadores” de gases, *cold traps*, etc. y aparatos de medida de pureza del litio que aseguren la limpieza del material y que, a su vez, cuantifiquen la efectividad de los distintos métodos de purificación.

Como caso particular de los estudios de difusión de gases en los metales líquidos y los sistemas asociados de extracción, hay que señalar que el estudio de la retención, permeabilidad, solubilidad y difusividad del tritio es uno de los temas de interés en el campo de la fusión, de cara al desarrollo de barreras de permeación o a los sistemas de extracción de tritio. A pesar de que existen ya muchos datos para Pb-Li, muchos de ellos son contradictorios por lo que, con lo que respecta al litio puro (menos estudiado), se prevé una situación similar. De este modo, se puede considerar una de las líneas de investigación que actualmente requiere más colaboración internacional. Así, en esta zona de experimentación podrían probarse este tipo de procesos, por ejemplo inyectando artificialmente hidrógeno o deuterio en una corriente de litio. En la Figura 7.23 puede verse un ejemplo de control de tritio mediante una trampa de litio.

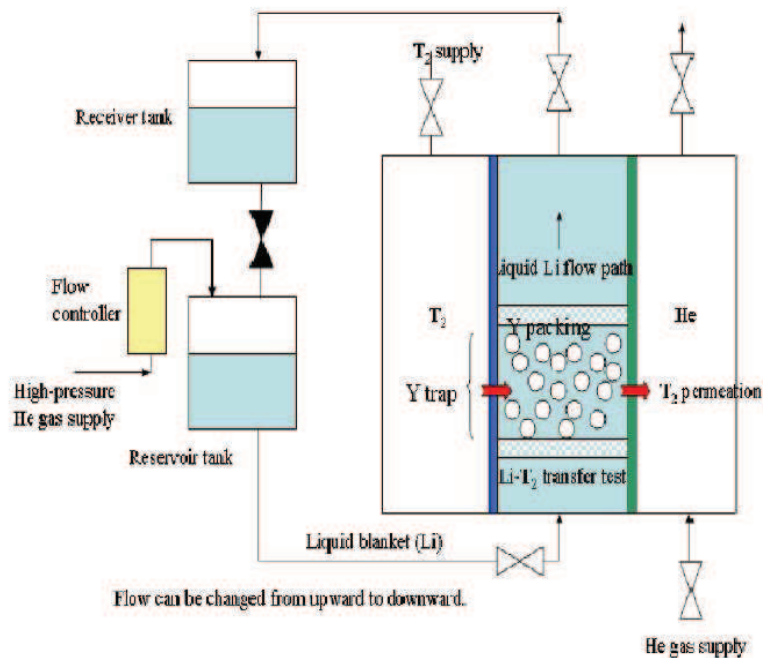


Figura 7.23. Control de tritio mediante trampa de litio, *Kyushu University (Japan)* .

7.5.5. Ensayos de seguridad

La seguridad será una de las líneas experimentales de *TechnoFusión* que permitirá el estudio de los principales factores que tienen que ver con la seguridad en el manejo del Li, como las reacciones con agua, aire, residuos, análisis de accidentes, etc.

Los principales problemas que pueden surgir cuando el fluido de trabajo es litio son las posibles reacciones con el aire y el agua fundamentalmente. A la hora de elaborar un protocolo de seguridad en cuanto a su manejo es necesario realizar experimentos que proporcionen datos, al margen de los cálculos que se puedan realizar. De esta manera, como una de las capacidades experimentales del Área ATML de *TechnoFusión* se han identificado los ensayos de seguridad. Así, podrían realizarse experimentos de vertidos de litio en la atmósfera y/o agua, inyección de aire y/o agua en el litio, simulaciones de accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA) de cara a futuras instalaciones como IFMIF, incendios, etc.

7.5.6. Sistemas auxiliares y diagnósticos

Los circuitos de litio líquido estarán provistos de numerosos diagnósticos, como cámaras (Figura 7.24), acelerómetros láser, sondas (Figura 7.25), distintos tipos de sensores, termopares, medidores de radiación, etc.

El desarrollo tanto de elementos fundamentales del lazo como de diagnósticos especiales será objeto de estudio debido a la escasez de tecnología comercial relacionada con este tipo de instalaciones.

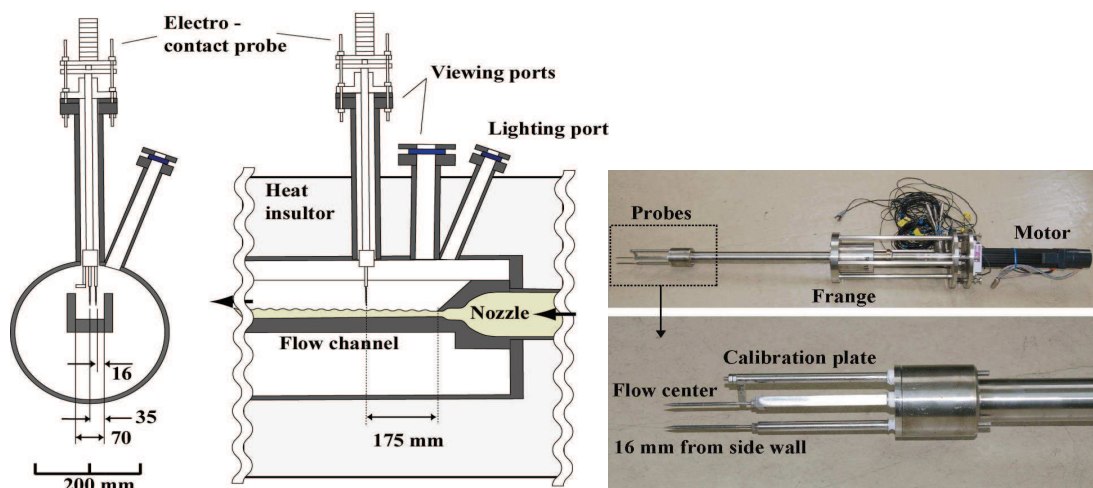


Figura 7.24. Fotografía y esquema de una sonda de contacto eléctrico para medidas de las ondas superficiales.

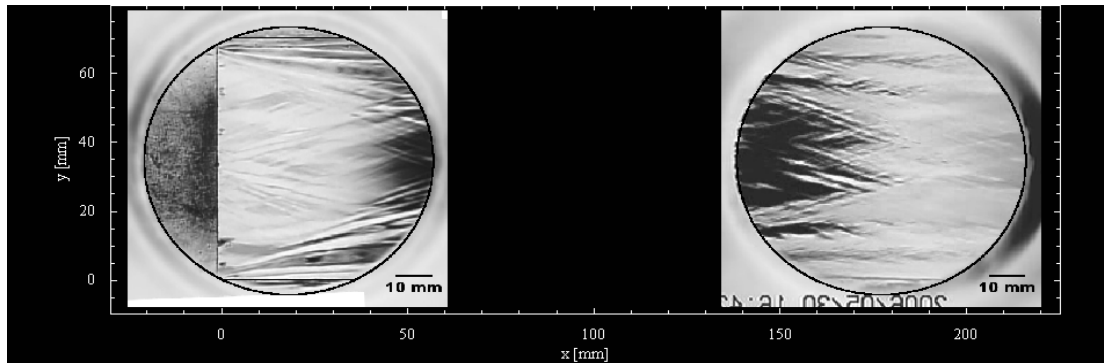


Figura 7.25. Imagen de metal líquido obtenida por la cámara Sencicam QE (PCO AG) en la Universidad de Osaka.

7.5.7. Ensayos con plomo-litio

Debido a la importancia del eutéctico plomo-litio en el campo de la fusión y a pesar de que ya existe en Europa un gran número de instalaciones dedicadas a su estudio, no se descarta la posibilidad dentro del Área ATML de *TechnoFusión* de efectuar algún experimento relacionado con él.

Así, se tratará, en la manera de lo posible de compatibilizar los circuitos para su operación con Pb-Li. Sin embargo, ya que los ensayos con litio-plomo requieren en general bajas velocidades de trabajo se podría disponer de un circuito básico dedicado a Pb-Li basado en convección natural. De esta manera, aprovechando los diagnósticos y las zonas experimentales diseñadas para el circuito de litio, se pueden obtener resultados interesantes para dicha aleación. Un esquema del lazo podría ser el que se muestra en la Figura 7.26.

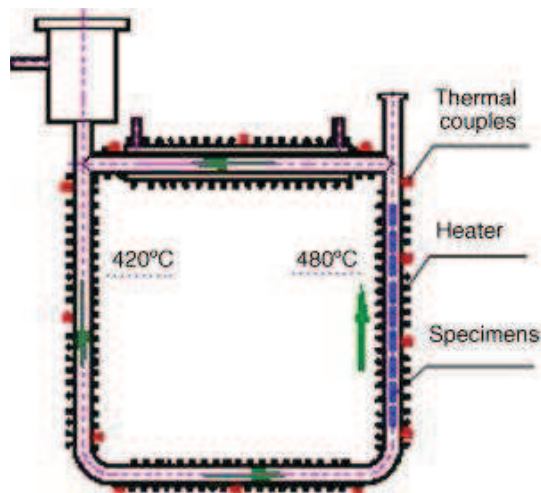


Figura 7.26. Esquema conceptual de un lazo de litio plomo a convección natural.

Esta zona también podría someterse a campos electromagnéticos para probar distintas configuraciones útiles para los futuros *blankets* de ITER y DEMO.

7.5.8. Validación de herramientas computacionales

Las herramientas computacionales orientadas al diseño de ingeniería de sistemas de fusión han de contar con la capacidad necesaria para describir y simular los fenómenos más relevantes relacionados con el comportamiento de los materiales que los integran.

La validación de las herramientas de diseño para la simulación de circuitos por los que circula un metal líquido se convierte en una necesidad⁶¹. El diseño de los canales de refrigeración para ITER y DEMO, así como el complejo diseño de la fuente de neutrones de IFMIF se realiza con códigos CFD. Se ha detectado que la validación completa de estos códigos multipropósito se hace necesaria en su aplicación con metales líquidos, ya que:

- Los modelos de turbulencia que se utilizan en los códigos CFD comerciales no tienen claro todavía su rango de aplicación, sobre todo en relación a los límites derivados del valor del número de *Prandtl* turbulento.
- Los modelos que utilizan los códigos CFD comerciales no parecen apropiados para los casos de flujo de metal líquido, ya que suelen asumir la simplificación derivada de la analogía de *Reynolds*, en la que la capa límite térmica y la de velocidad son prácticamente coincidentes, y no se cumple en fluidos con bajo número de *Pr* como es el caso del litio⁶².
- Los efectos de empuje por gravedad y sus modelos multifásicos en los códigos CFD tienen que ser aún mejorados en fluidos con bajos *Pr* y *Peclet*, como es el caso de los metales líquidos.

7.6. Requerimientos de espacios físicos, instalaciones y seguridad

(I) Espacios físicos e instalaciones requeridas

El edificio que albergue el Área experimental de Tecnología de Metales Líquidos de *TechnoFusión* deberá cumplir una serie de requisitos impuestos por, entre otros, el espacio físico requerido por las instalaciones, la seguridad relacionada con los distintos experimentos: manejo de metales líquidos, campos magnéticos, altas temperaturas, etc. y, como factor crítico, los condicionantes que imponga el

⁶¹ A. Abánades, F. Sordo, J. Muñoz, A. Lafuente, J. M. Martínez-Val. "Application of Computational Fluid Dynamics analysis to the design of liquid metal technology for fusion devices". 22th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering 2007 (SOFE22), Albuquerque (Estados Unidos), 17-21 Junio 2007. ISBN 1-4244-1194-7

⁶² El número de Prandtl (*Pr*) es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

acoplamiento del acelerador de electrones a los circuitos de metal líquido, tanto en cuanto a la ubicación relativa de ambos sistemas, como a la seguridad radiológica (instalación de blindajes, gestión de accesos, etc.).

En cuanto al espacio físico necesario para las instalaciones, hay que señalar que el circuito del experimento de superficie libre con acoplamiento al acelerador deberá tener una altura de unos 15 metros. Dicha cifra viene impuesta por la necesidad de disponer de una columna de litio suficiente como para evitar la cavitación en la aspiración de la bomba de impulsión. Para lograr dicha altura, se puede recurrir a la construcción de parte del circuito bajo tierra, con los depósitos y las bombas en un sótano, o mejor aún, en un foso (como el existente en la instalación de la Universidad de Osaka), que se podría inundar con argón en caso de una fuga de litio.

Las instalaciones internacionales que se han estudiado como referencia a la propuesta para *TechnoFusión*, suelen disponer de los circuitos de experimentación en una nave diáfana, en la que los equipos se manejan mediante una grúa. El caso de la instalación IPPE de Obninsk es especial ya que presenta el circuito de litio de alguna manera encerrado en una caja metálica que atraviesa los distintos pisos que conforman el laboratorio, aunque posiblemente este tipo de implantación obedezca al aprovechamiento de unos laboratorios inicialmente dedicados a otros usos. Ambas soluciones son posibles, aunque la primera permite mayor flexibilidad a la hora de instalar los distintos circuitos y mejor acceso a todos los componentes.

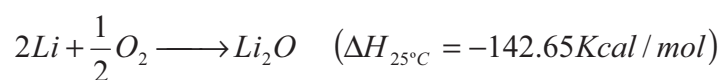
Un estudio detallado de la implantación de los circuitos, así como del espacio requerido por los sistemas auxiliares permitirá afinar más en el dato del espacio necesario, pero una primera estimación podría dar unos 300 m² en planta para el Área ATML de *TechnoFusión*.

(II) Seguridad

El trabajo con metales alcalinos, como es el caso del litio, requiere unos procedimientos muy bien establecidos para el desarrollo de los trabajos y de los experimentos que se tengan que albergar.

El litio ha de estar sujeto a la serie de procedimientos expuestos como consecuencia de las posibles reacciones a las que puede dar lugar en presencia de componentes del aire, tales como oxígeno, nitrógeno y agua. Este elemento reacciona violentamente con agua y puede sufrir combustión espontánea en presencia de aire a altas temperaturas.

Con el oxígeno, el litio reacciona produciendo óxido de litio (ecuaciones 7.2.).



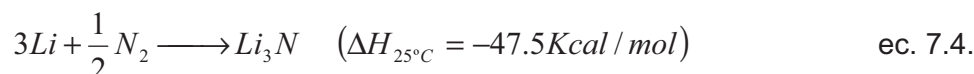
ec. 7.2.



El Li_2O es muy reactivo con agua, dióxido de carbono y compuestos refractarios. En su reacción con agua produce hidróxido que provoca quemaduras en piel, ojos u otros tejidos (ecuación 7.3).



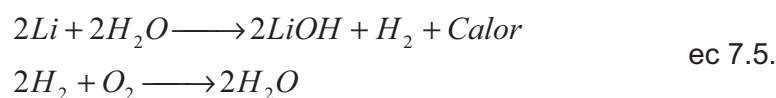
En presencia de nitrógeno, el litio reacciona según el siguiente esquema de reacción (ecuación 7.4.):



El Li_3N generado es muy reactivo. Puede formarse amoníaco en presencia de agua. No se ha encontrado ningún metal o cerámico resistente al nitruro fundido.

El litio reaccionará con el oxígeno y resto de gases del aire excepto los gases nobles. Se han registrado valores de temperatura de ignición del litio en aire desde 180°C hasta 640°C . Este hecho implica que el tratamiento de litio se deba realizar en un ambiente con atmósferas de gases inertes.

En presencia de agua el litio reacciona violentamente formando hidróxido de litio e hidrógeno gas. Normalmente, la reacción viene acompañada por una explosión causada por la reacción secundaria del hidrógeno con el oxígeno:



El calor generado en la primera reacción es suficiente para producir la segunda reacción.

Entre las medidas de seguridad que se requieren en la operación con un lazo de litio son de especial importancia:

- La formación especializada para todas las personas y operarios que vayan a estar en contacto con las instalaciones o que las vayan a operar y manipular.
- Los planes de emergencia para parada de equipos en condiciones seguras.
- Los equipos de actuación en caso de emergencia tales como trajes protectores, mascarillas y extintores adaptados al tipo de fuego esperado.
- Los equipos de protección para el personal de operación en caso de fuga o fisura en el circuito.
- Los depósitos auxiliares de litio para el vaciado del circuito y recogida de fugas.

- Los sistemas de ventilación y filtrado de la atmósfera del local para el caso en que se formen humos de óxidos o hidróxidos de litio.
- Los sistemas de detección de fugas de litio, de deflagraciones y de extinción de incendios.
- Las salvaguardias para la prevención de la entrada de agua y otros materiales incompatibles en el lazo de litio.
- Las protecciones para los equipos en caso de funcionamiento anómalo.
- La señalización de las estancias que contengan cierta cantidad de litio.

(a) Análisis de la seguridad de la operación de los circuitos

El Área ATML de *TechnoFusión* pretende servir como referencia para el desarrollo del proyecto IFMIF de manera que muchos de los aspectos de seguridad serán comunes a lo que se han de implantar para esa instalación.

Se han realizado con anterioridad algunos análisis de seguridad sobre el *target* de litio de la instalación experimental IFMIF^{63, 64, 65} evaluando los factores de riesgo más importantes. El procedimiento empleado en dichos estudios ha sido el FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Además, se ha aplicado la técnica del árbol de fallos para evaluar todos los posibles fallos de cada componente relacionado con la operación segura del lazo. El análisis de seguridad de un lazo de metal líquido requiere la utilización de un código de simulación termo-hidráulico que permita estimar los efectos que se producen ante un determinado suceso.

En el caso del lazo de *TechnoFusión*, y en base al trabajo realizado para la instalación IFMIF, se han podido identificar una lista particular de eventos posibles:

- Pérdida de caudal de litio en el lazo.
- Pérdida de caudal del lazo de refrigeración de la *cold trap*.
- Pérdida de sumidero de calor.
- Accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) en el lazo de litio.
- Pérdida de purificación del litio.
- Vertido de litio en la nave.
- Rotura de una tubería de litio.

⁶³ L. Burgazzi, "Safety assessment of a lithium target", Nuclear Engineering and Design, 2006

⁶⁴ L. Burgazzi, " Probabilistic safety analysis of an accelerator-Lithium target based experimental facility", Nuclear Engineering and Design, 2006

⁶⁵ L. Burgazzi, "Hazard evaluation of The International Fusion Materials Irradiation Facility", Fusion Engineering and Design, 2005

- Pérdida de vacío en la zona de superficie libre.
- Pérdida de argón.

Otros posibles eventos, que deberán tratarse en mayor profundidad a medida que el circuito se vaya diseñando son:

- Fallo de sistemas auxiliares como bombas, válvulas, etc.
- Fallo en el sistema de control.
- Pérdida del suministro eléctrico.
- Pérdida del aire comprimido.
- Entrada de agua en el circuito.
- Entrada de aire en el circuito.
- Entrada de aceite en el circuito.

(b) Seguridad de los sistemas de vaciado y llenado

Una de las tareas más delicadas en relación con la operación del circuito de metal líquido será el llenado y vaciado del mismo. Esta actividad será aún más importante si se piensa en la posibilidad de utilizar circuitos con varios metales líquidos.

El litio líquido es un material que tiene que suministrarse con unas importantes medidas de seguridad en las que se busca básicamente evitar el contacto con la atmósfera y con agua. Se puede proporcionar en el interior de un depósito provisto de unos calentadores eléctricos bajo una capa de una mezcla de aceite y parafina.

(c) Seguridad de la gestión de residuos

La legislación española aplicable en una instalación que cuenta con productos químicos es la que regula el almacenamiento de la materia prima. En ese sentido, el Ministerio de Industria aprobó el Real Decreto 379/2001 del 6 de abril en el que se expone el “Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias”, que tiene por objeto establecer las condiciones de seguridad de las instalaciones de almacenamiento, carga, descarga y trasiego de productos químicos peligrosos. Para ello, incluye una descripción detallada del proyecto a presentar para la inscripción de una instalación, los controles periódicos que han de pasar, el control administrativo y las sanciones pertinentes si se cometen infracciones. Este reglamento incluye también un conjunto de Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) para cada tipo de producto.

En el artículo 2 del mencionado Real Decreto se describe el ámbito de aplicación de la normativa. El litio, principal constituyente del Área ATML, entraría dentro del grupo de sólidos corrosivos, aunque quedaría fuera del alcance de esta guía si el

inventario total es menor que 200 kg. A día de hoy no existe una regulación específica para productos de las características del litio, por lo que no existe una especificación para proyectos de licenciamiento de este tipo de instalaciones, aunque está prevista la aprobación de una nueva normativa que regule el manejo y almacenamiento de sólidos inflamables.

Este hecho implica que la normativa aplicable en el caso de un laboratorio se reduzca a cumplir las directrices descritas en la Ficha Internacional de Seguridad Química (ICSC) y a cumplir con las medidas que se describen en la Guía de Respuesta a Emergencias (GRE 2004).

Estas fichas no tienen estatus legal, pero recopilan de forma clara la información esencial de higiene y seguridad de las sustancias químicas a las que hacen referencia. El número de ficha del litio es la ICSC 0710, y algunas de las indicaciones más relevantes que proporciona son:

- Evitar las llamas. No producir chispas y no fumar.
- No poner el producto en contacto con el agua.
- En caso de incendio, no utilizar agua, sino agentes especiales como arena seca.
- Mantener fríos los bidones de almacenamiento y demás instalaciones.
- En caso de derrames o fugas, retirar la sustancia derramada e introducirla en un recipiente metálico precintable, recogiendo cuidadosamente el residuo con arena seca u otro absorbente inerte. Nunca verterlo al alcantarillado.
- El personal debe llevar un traje de protección completo, incluyendo un equipo autónomo de respiración.