

# **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 IFMIF<sup>1</sup>, 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.

---

<sup>1</sup> 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.



## 9. Área de experimentación de Tecnologías de Manipulación Remota

### 9.1. Introducción

La consolidación de la fusión nuclear como fuente de energía va a requerir de un extraordinario desarrollo de sistemas robotizados de Manipulación Remota (MR), tanto autónomos como dirigidos a distancia por un operador. Entre las razones para recurrir a sistemas remotos en la realización de muchas de las operaciones dentro de las instalaciones del reactor se encuentran las grandes dimensiones y el peso de las piezas y herramientas a manejar y, sobretodo, la radiación presente por la activación de los equipos y materiales cercanos al dispositivo. Debido a esto, las plantas de energía de fusión futuras poseerán un mantenimiento constante y complejo por medio de MR, suponiendo estos sistemas un factor decisivo para su proliferación y viabilidad. Para otros tipos de dispositivos de fusión experimentales como ITER o JET, la importancia de estos sistemas de MR es igualmente destacable, a causa de la naturaleza de ensayo de dichas instalaciones, que conllevan frecuentes mejoras, ajustes periódicos, sustitución de equipos de diagnósticos y sistemas complejos y muy sensibles.

Existen otras instalaciones relacionadas con el ámbito de la fusión nuclear que requieren también de uso intensivo de MR. Como ejemplo más destacado se encuentra IFMIF. Esta instalación permitirá realizar estudios del comportamiento de materiales bajo irradiación neutrónica, por lo que la activación de los diferentes componentes y materiales de la instalación será elevada, y por tanto, la MR será esencial para realizar las labores de mantenimiento y operación.

En la Tabla 9.1 se muestra la comparación entre tres dispositivos de fusión con diferentes necesidades en el área de MR, resaltando las características claves y dificultades en cada uno de ellos.

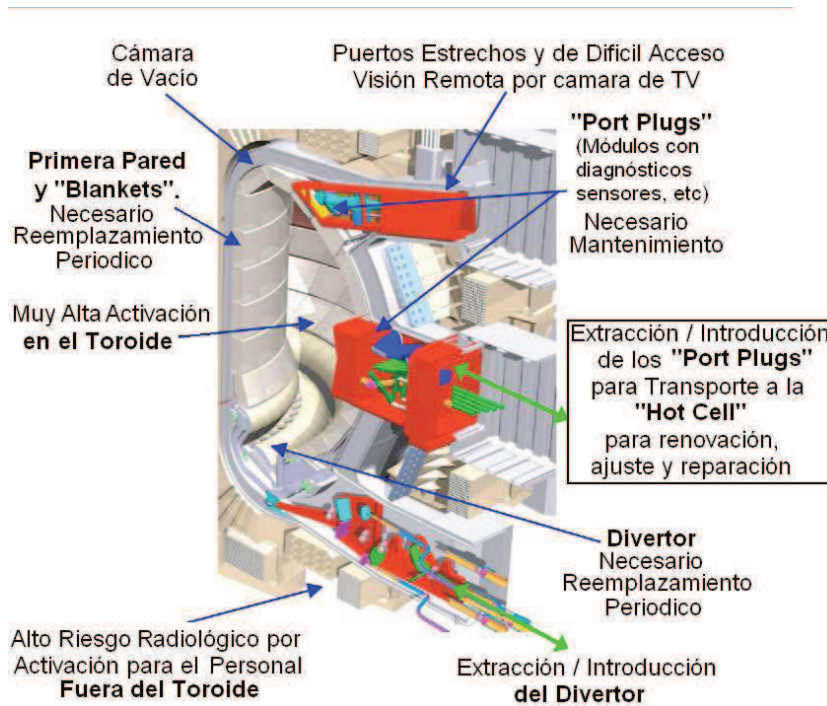
**Tabla 9.1.** Comparación del mantenimiento remoto en tres dispositivos fusión representativos.

Manipulación Remota (MR) en dispositivos de fusión					
Dispositivo	Disponibilidad y necesidad de MR	Complejidad de la instalación	Tamaño y peso de los componentes	Dosis dentro del Toroide (Gy/h)	Estado
JET	Media Importante	Alta	$2 \times 10^3$ Kg <2 m	$\sim 10^{-3}$	En funcionamiento *
ITER	Media Muy importante	Muy alta	$< 50 \times 10^3$ Kg 10 m ó más	$\sim 10^2$	Futuro próximo
DEMO, comercial	Alta Decisiva	Medio-alta	$10 \times 10^3$ Kg 10 m ó más	$\sim 10^3$	A largo plazo

\*JET esta equipado con sistemas de MR que han probado la viabilidad del uso de la robótica en dispositivos de fusión, proporcionando un inestimable conocimiento a esta disciplina.

Los factores que más impacto presentan en MR en fusión son: el grado de activación de los componentes en el toroide y en su área de influencia, el aumento de la contaminación en el interior de la vasija debido, sobre todo, al tritio, la disponibilidad requerida, el tamaño y peso de los componentes y el número y complejidad de los componentes/instrumentación a mantener. Como se deduce de la Tabla 9.1 todos los factores, excepto la complejidad, aumentan en magnitud desde la máquina más sencilla de las tres como JET hasta el reactor comercial DEMO.

En los reactores de fusión que usan como combustible la reacción de deuterio-tritio se generan neutrones de hasta 14 MeV. Estos neutrones de altas energías llegan a producir isótopos radiactivos debido a la transmutación de los elementos químicos en las partes internas del toroide. Existen zonas (ver Figura 9.1) donde esta activación puede llegar a ser mayor por la geometría de diseño del dispositivo: la primera pared, el *blanket*, el divertor y los *Port Plugs* (puertos experimentales). Igualmente, la cámara de vacío y los componentes situados fuera del toroide pueden llegar a activarse aunque en menor medida.



**Figura 9.1.** Vista de una sección poloidal de ITER.

El lugar de mayor activación en los reactores de fusión es el interior del toroide, donde el acceso de los operadores estará totalmente prohibido (Figura 9.1). Dentro del toroide de ITER se estiman dosis de cientos de Sieverts/hora (Sv/h) lo que supone varios órdenes de magnitud por encima del máximo permitido para personal profesionalmente expuesto (usualmente 1 mSv/h durante un periodo de tiempo de menos de una hora). Del mismo modo, las impurezas internas activadas, la

acumulación de gases nocivos y de materiales tóxicos hace imposible el acceso humano al interior.

Existen también otras áreas de acceso restringido como es el caso de las salas de mantenimiento, donde muchos de los componentes activados requieren ajustes, renovaciones o reparaciones después de su extracción del toroide. Para estas operaciones es necesaria una sala blindada equipada con manipuladores de acción remota donde realizarlas lo más rápido y eficientemente posible. Dichas salas son las llamadas *Hot Cells*. Algunas de las operaciones de mantenimiento que se pueden llevar a cabo en ellas son: movimiento, extracción, levantamiento, ensamblado/desensamblado, corte y unión por soldadura de tuberías y contenedores, atornillado/desatornillado, conexión/desconexión de pestañas o bridas y conectores eléctricos, limpieza, inspección, etc.

A lo anterior se suma el hecho de que la disponibilidad de una planta energética de fusión es un punto crítico ya que el coste de la electricidad, es decir, el rendimiento del reactor, está directamente relacionado con el tiempo invertido en paradas de mantenimiento planificadas o no planificadas. Durante un mantenimiento planeado se llevan a cabo una serie de inspecciones, ajustes, reparaciones y sustituciones programadas con una inversión de tiempo que debe estar igualmente planificada. Pero también puede ser necesario un mantenimiento no planeado para solucionar fallos ocurridos durante una operación normal, implicando paradas no programadas del reactor con la correspondiente reducción de la disponibilidad o rendimiento.

En el esquema de la Figura 9.2 se resumen las principales razones por las que la MR es indispensable en los futuros dispositivos de fusión.



**Figura 9.2.** Factores que aumentan la importancia del uso de la MR en fusión.

En el área de la fusión nuclear, la MR debe probarse experimentalmente con todos los componentes y partes de las instalaciones no sólo para probar el manipulador y los posibles planes de operación, sino para obtener experiencia en la sinergia entre MR y la forma, operación y diseños de los dispositivos a ser usados, mejorando y refinando en la medida de lo posible todos ellos. La experiencia que se adquiriera probando los prototipos y maquetas de manipulación remota en las instalaciones de *TechnoFusión*, proporcionará una información muy valiosa y necesaria para su futura aplicación en los dispositivos de fusión. Esto permitirá, entre otras cosas, simplificar y reducir la duración de las operaciones de manipulación remota, así como optimizar su fiabilidad.

Todo lo expuesto avala un gran futuro para el **Área de experimentación de Tecnologías de Manipulación Remota (ATMR)** propuesta para *TechnoFusión*, una instalación dedicada específicamente al ámbito de la manipulación remota. Esta área jugará un papel motor y dinamizador fundamental para la ciencia y la tecnología en España y en la Comunidad de Madrid en este campo y se concibe en el marco de una estrategia global a largo plazo.

## 9.2. Objetivos

El objetivo básico inmediato del Área ATMR de *TechnoFusión* es disponer de unas instalaciones en las que probar y poner a punto los equipos y procedimientos de trabajo de telerrobótica que puedan contribuir al mantenimiento y reparación de instalaciones de fusión nuclear, principalmente ITER, DEMO e IFMIF. Además, esta Área debe servir para promover el desarrollo de la tecnología necesaria para dicho fin, siendo la base para realizar investigaciones y actividades relacionadas con ella. Esto significa en primer lugar que la inversión en equipamiento tecnológico que es preciso hacer para el Área ATMR de *TechnoFusión* debe aprovecharse para desarrollar conocimiento en el entorno sobre esas tecnologías.

Según todo lo anteriormente expuesto los objetivos fundamentales del Área ATMR serán:

- 1) Desarrollar, probar, ensayar y certificar los dispositivos de manipulación remota que una instalación de fusión nuclear requiere.
- 2) Promover el desarrollo y explotación de conocimientos y de tecnología en el campo de la manipulación remota en general y para instalaciones de fusión nuclear en particular.

Para el cumplimiento de estos dos objetivos se deberá:

- Disponer de unas instalaciones en las que desarrollar, poner a punto y probar los equipos y procedimientos de trabajo relacionados con la manipulación remota en fusión nuclear.
- Crear la infraestructura de manipulación remota que permita el ensayo y homologación de los equipos propios de las instalaciones de fusión nuclear.

- Proponer y desarrollar actividades de investigación en robótica y manipulación remota a través del personal propio y de los grupos de investigación asociados a *TechnoFusión*.
- Ser un foco activo y dinámico en la divulgación y difusión de la ciencia y la tecnología en el área de la robótica avanzada, los robots de servicios y la manipulación remota para la fusión nuclear.
- Contribuir a la explotación de los conocimientos y resultados de las investigaciones generados mediante una estrecha relación con el entorno industrial y la promoción de la creación de nuevas empresas.

Para ello se contará con una serie de recursos materiales e infraestructuras singulares que, junto con un personal altamente especializado, permitirá a *TechnoFusión* estar a la vanguardia internacional en el área de la manipulación remota orientada especialmente a la fusión. En cuanto a las actividades a realizar en este marco destacan las siguientes:

- Ensayos, certificaciones y homologaciones: las infraestructuras del Área ATMR así como la cualificación de su personal y los métodos y procedimientos que se establezcan, permitirán la prestación de servicios externos de ensayo, certificación y homologación de equipos y sistemas destinados a su uso bajo condiciones de alta radiación. Asimismo, se procurará una participación activa en los órganos internacionales de normalización encargados de fijar el método y los criterios para el ensayo de estos sistemas.
- Investigación y desarrollo de tecnologías de manipulación remota: con el objeto de aportar nuevas soluciones, herramientas y tecnologías para abordar de la mejor manera las complejas tareas de manipulación remota que puedan precisarse para el mantenimiento, operación e investigación en operaciones asociadas a la fusión nuclear, el Área ATMR realizará una continua labor de investigación y desarrollo en las disciplinas involucradas. Estos desarrollos, independientemente de su explotación mediante patentes y transferencias tecnológicas, serán de aplicación en los proyectos de I+D desarrollados por *TechnoFusión* en esta Área.
- Prestación de infraestructuras e instalaciones: el Área ATMR estará dotada de unas instalaciones singulares, en algunos aspectos únicas en el contexto internacional, adecuadas para poder evaluar, probar y entrenar los procedimientos y equipamiento que otros Centros o empresas internacionales desarrollen, antes de ser puestos en operación real. En este sentido se considera de gran interés para el sector de fusión así como una vía complementaria de financiación para *TechnoFusión*, la contratación de servicios de prestación de las infraestructuras singulares y en su caso la adecuación de las auxiliares, para la realización de dichas actividades de evaluación prueba y entrenamiento.

### **9.3. Situación internacional de las tecnologías propuestas**

#### **9.3.1. Instalaciones de referencia internacionales en tecnologías de manipulación remota para fusión**

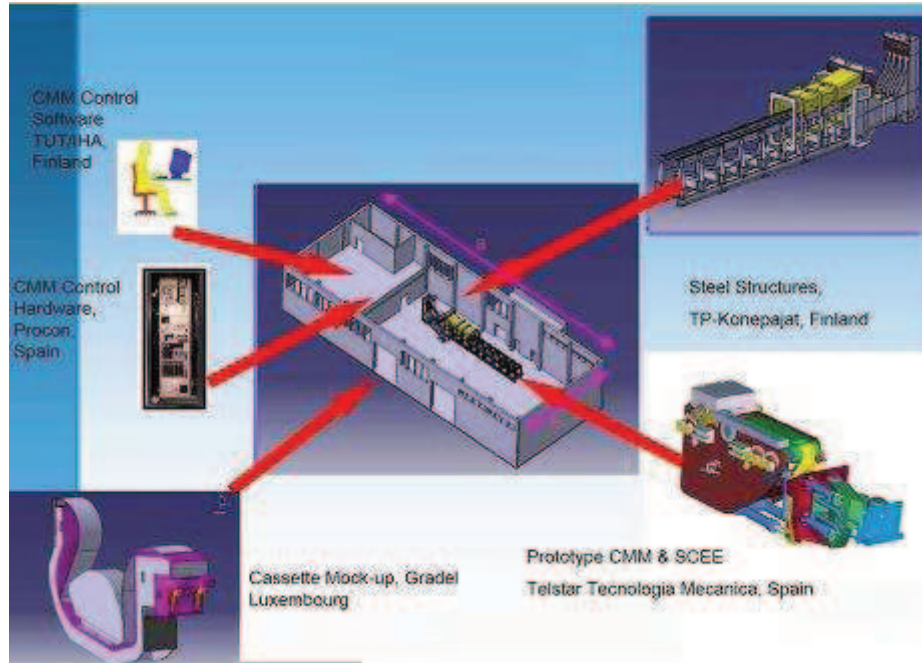
La mayoría de los laboratorios que se enumeran a continuación son laboratorios internacionales centrados principalmente en tareas de MR en ITER debido a la urgencia y a la multitud de áreas de MR que actualmente necesitan de validación y mejora. Algunas de las actividades desarrolladas con MR en ITER, a la espera de ser validadas, están relacionadas con el manejo y manipulación de diferentes elementos como: los *Casetes* del divertor, las puertas de conexión experimental para diagnósticos, módulos de protección, etc. Sin embargo, los nuevos proyectos de fusión como IFMIF están empezando a demandar también laboratorios especializados de MR aplicada a la fusión. A continuación se destacan los tres principales laboratorios de MR aplicada a la fusión y de relevancia mundial existentes en la actualidad.

##### **(I) Instalación de ensayos DTP2, Tampere (Finlandia)**

La plataforma de pruebas de divertor 2 (*Divertor Test Platform 2, DTP2*), es una instalación para realizar ensayos de sistemas para extracción/introducción y movimiento de los casetes del divertor de ITER (módulos con forma de “W” que reciben la mayoría del calentamiento por medio del plasma térmico (Ver Figura 9.3). La instalación fue ubicada en las instalaciones del *VTT Technical Research Centre* de Finlandia en mayo de 2007, una gran organización de investigación aplicada que proporciona grandes soluciones tecnológicas y servicios de innovación. La nueva nave experimental de VTT está localizada en el Campus de Tecnologías en los alrededores de la Universidad de Tecnologías de Tampere.

Un esquema de la instalación y de sus principales salas y equipamientos se muestra en la Figura 9.3 donde puede verse la referencia a la aportación de dos empresas españolas. En la Figura 9.4 se muestra una fotografía del área experimental de la instalación.

Las instalaciones de ensayos DTP2 estarán inicialmente concentradas en el movimiento radial (desde el interior del toroide de ITER hacia el exterior) de los casetes del divertor, desarrollados por el *Cassete Multi-functional Mover (CMM)*, (ver Figura 9.3). En una segunda etapa la instalación extenderá sus estudios a temas relacionados con movimientos toroidales de los casetes dentro del toroide de ITER. La instalación cuenta además con: dispositivos de levantamiento, un robot de mantenimiento, raíles soportes para el divertor, estructuras alargadas de acero para la extracción de los casetes del divertor, hardware de control y software y una sala de control (ver Figuras 9.3, 9.4 y 9.5).



**Figura 9.3.** Salas y equipamientos en la instalación DTP2 en el VTT de Tampere, Finlandia<sup>142</sup>. Las dimensiones aproximadas son: a  $\approx$  50 m , b  $\approx$  20m.



**Figura 9.4.** Area experimental en DTP2<sup>143</sup> mostrando un cassette del divertor (negro y gris) así como las estructuras de acero para su transporte en (blanco).

<sup>142</sup> 'TEKES ITER-projectssince1994= ITER RH interests' ; Jouni Mattila ; Presentation in Tampere meeting ; Tampere , Finland ; December 2007

<sup>143</sup> 'RH Activities of the EURATOM/IST Association Portugal' ; Isabel Ribeiro et al. ; Presentation in Tampere meeting ; Tampere , Finland ; December 2007



**Figura 9.5.** Sala de control de la instalación DTP2 en 2007. Sistema de visión y simulación.

## (II) Laboratorio de MR del Centro de investigación ENEA, Brasimone (Italia)

El laboratorio desarrolla diferentes tareas de manipulación remota para distintos dispositivos de fusión. El proyecto y el equipamiento se ha modificado a lo largo del tiempo. A continuación se describirán brevemente tres de estas instalaciones:

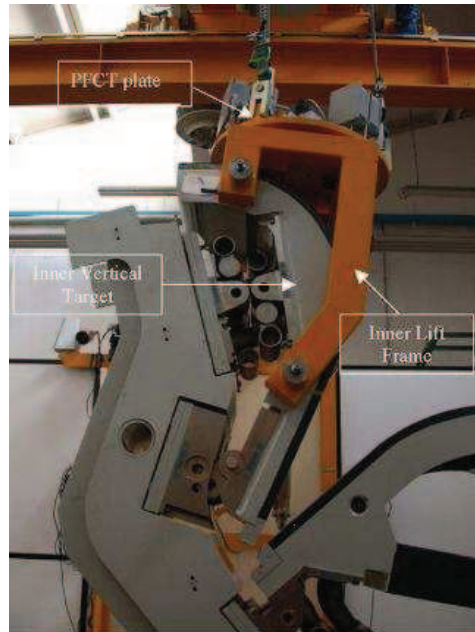
### 1) Plataforma de renovación del divertor

La plataforma de renovación del divertor (*Divertor Refurbishment Platform, DRP*) en ENEA ha vivido dos etapas: en una primera se probó la renovación del divertor para el diseño de ITER-1998, demostrando su correcto funcionamiento durante las campañas de ensayo entre 1999 y 2003. Para realizar estos ensayos fue necesario el uso de una grúa elevada (Figura 9.6).

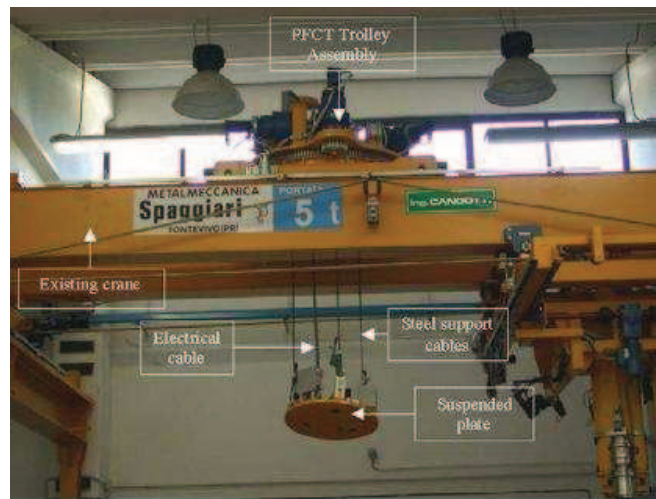
Sin embargo, el actual diseño de ITER (ITER FEAT), está equipado con casetes de divertor diferentes, por lo que la instalación DRP se modificó durante los años 2003–2005, adaptándola a los nuevos requerimientos. Se diseñaron e instalaron tres mecanismos elevadores (Figura 9.7) montados sobre un carro rodante movable, aprovechando la existencia de raíles de la grúa elevada en las instalaciones previas de DRP. Esta máquina experimental se llama *Plasma Facing Components Transporter, PFCT*. Los principales elementos del PFCT son el conjunto del carro, los cables y la plataforma suspendida (Figura 9.7).

El PFCT es un dispositivo capaz de elevar/inclinar las cargas manipulables de hasta 5 toneladas permitiendo hasta seis grados de libertad completos en la plataforma suspendida, actuando con una velocidad muy baja para realizar operaciones remotas de máxima precisión. Este dispositivo consigue velocidades de hasta 1 grado/s y una precisión de posición mayor de 0.25 mm.





**Figura 9.6.** Extracción del PFC vertical interno del Laboratorio de manipulación remota de ENEA.



**Figura 9.7.** Vista general<sup>144</sup> del PFCT del Laboratorio de manipulación remota de ENEA. Los elementos principales del PFCT son el carro de ensamblaje, los cables y la plataforma suspendida.

Igualmente, se llevaron a cabo en la instalación varios ensayos de las características del PFCT, además de ensayos de operación y de componentes.

<sup>144</sup> 'The plasma-facing components transporter (PFCT): A prototype system for PFC replacement on the new ITER 2001 cassette mock-up'; G. Micciché et al. , ENEA ; Fusion Engineering and Design ; January 2007

Inicialmente las características básicas se han mejorado en manipulaciones remotas como: elevación, evaluación de reproducibilidad del posicionamiento, bloqueo y desbloqueo de la plataforma suspendida (Figura 9.6), prueba de ejes (rotación, inclinación, elevación y bajada) de la plataforma suspendida, elevación/bajada del PFC la superficie protectora, mostrada en negro en la Figura 9.6 en el blanco vertical interno) desde/hacia el interior del casete del divertor y ensayo de la ejecución del hardware y software de control, entre otras operaciones.

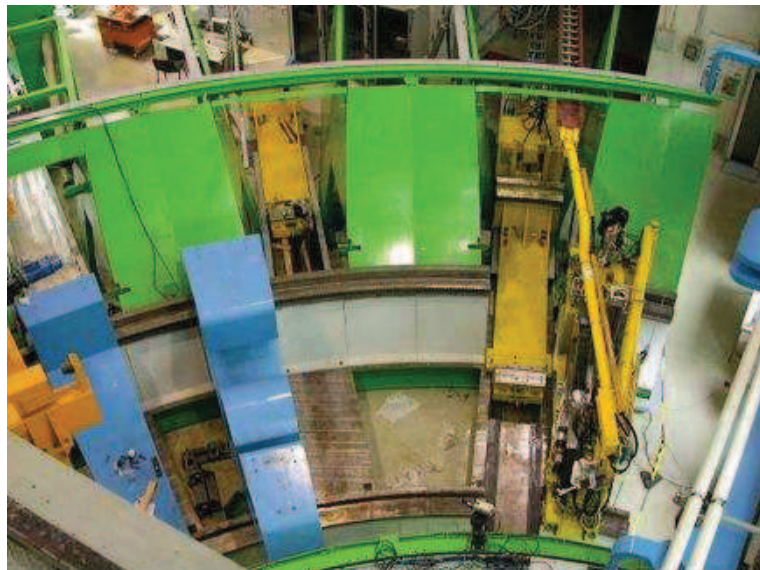
## 2) Plataforma de prueba del divertor, DTP

La instalación DTP (Figura 9.8), también llamada DTP1 (*Divertor Test Platform*), fue la primera instalación para el ensayo de MR del divertor completo por medio de una maqueta a escala. La instalación se usó durante varios años desde 1998 y se probó con éxito el casete del divertor del diseño inicial ITER-1998. El actual y definitivo diseño de ITER-FEAT y el nuevo divertor asociado a este nuevo diseño será probado en el DTP2 en Finlandia. El DTP, como se puede ver en la Figura 9.9, estaba compuesto por:

- Un sector de 72° de la región inferior de ITER.
- Un prototipo del Casete del divertor con sistema de bloqueo, puntos de agarre y conexiones de alimentación de refrigeración.
- Un prototipo para simulación del ambiente dentro de la vasija incluyendo railes toroidal y radial de la vasija de vacío y puertos del divertor entre otros dispositivos.
- Un prototipo de desplazamiento, incluyendo el sistema del dispositivo de desplazamiento o *Mover* del casete toroidal y radial (brazo robotizado, en amarillo, de la Figura 9.9), robots transportadores.
- Varios prototipos de equipamiento de MR auxiliar.
- Un control y sistema de adquisición de datos localizado en la sala de control.



**Figura 9.8.** Vista general de la instalación DTP<sup>145</sup> del Laboratorio de manipulación remota de ENEA.

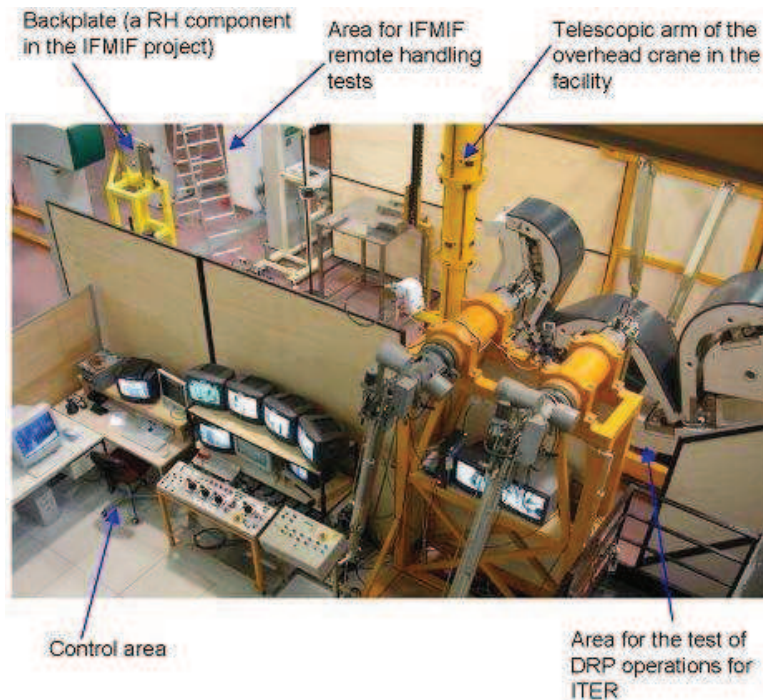


**Figura 9.9.** Vista del área de la instalación DTP mostrando el *Mover* del casete del interior de la vasija (en amarillo) y maquetas del divertor (en azul). El sector 72° de la región inferior de ITER y sus raíles se muestra en verde<sup>70</sup>.

<sup>145</sup> 'What we do in The Vessel in-Vessel Field' ; Michael A. Pick ; EFDA activities 2006

### 3) Pruebas en IFMIF

Con el desarrollo del diseño de IFMIF han ido surgiendo nuevas necesidades de MR. Por ello se ha introducido en esta instalación un área para ensayar la manipulación de los componentes de IFMIF (ver Figura 9.10). Teniendo en mente la Figura 9.7 y la Figura 9.10 es posible hacerse una idea de las dimensiones y estructuras del laboratorio.

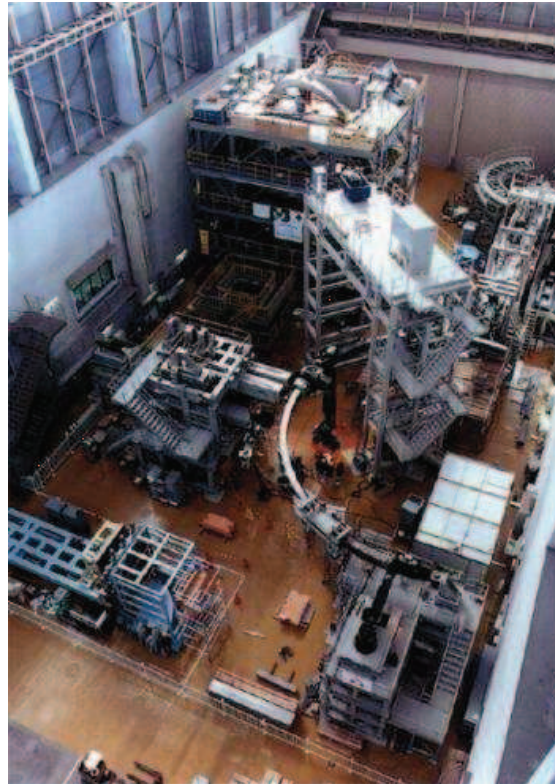


**Figura 9.10.** Vista general del laboratorio de MR del centro de investigación ENEA localizado en Brasimone.

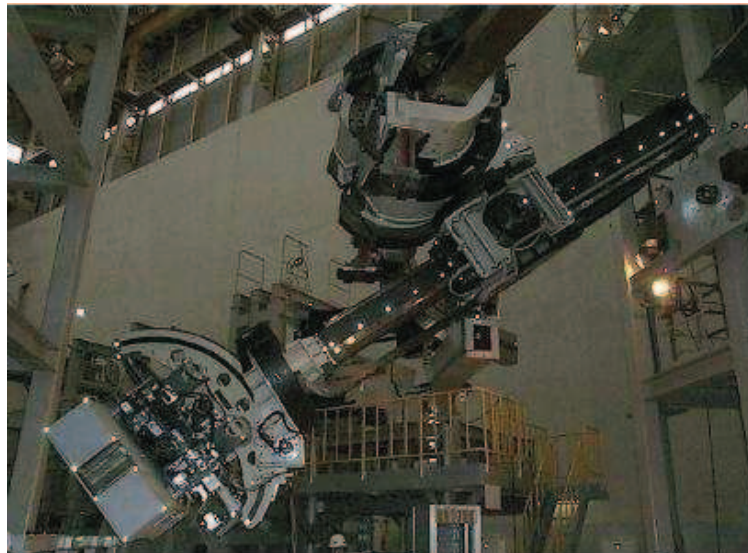
### (III) Instalación para transportador interno de la cámara/vasija (IVT), Japón

En la Figura 9.11 se muestra una vista general de la instalación IVT (*In-Vessel Transporter*), un complejo de instalaciones para la certificación y desarrollo de manipuladores de intercambio de los módulos del *blanket* de ITER. Estos módulos necesitarán ser renovados realizando sustituciones periódicas a causa del daño y deterioro sufrido al estar expuestos al plasma y a la irradiación de neutrones. Del mismo modo, es necesario el intercambio de los módulos del *blanket* para realizar ensayos y mejoras de los materiales expuestos al plasma.

En las Figuras 9.12 y 9.13 se muestran los detalles del transportador interno de la cámara de vacío en la instalación IVT. Este transportador es el manipulador que permite el acople/desacople y el transporte del *blanket* dentro del toroide.

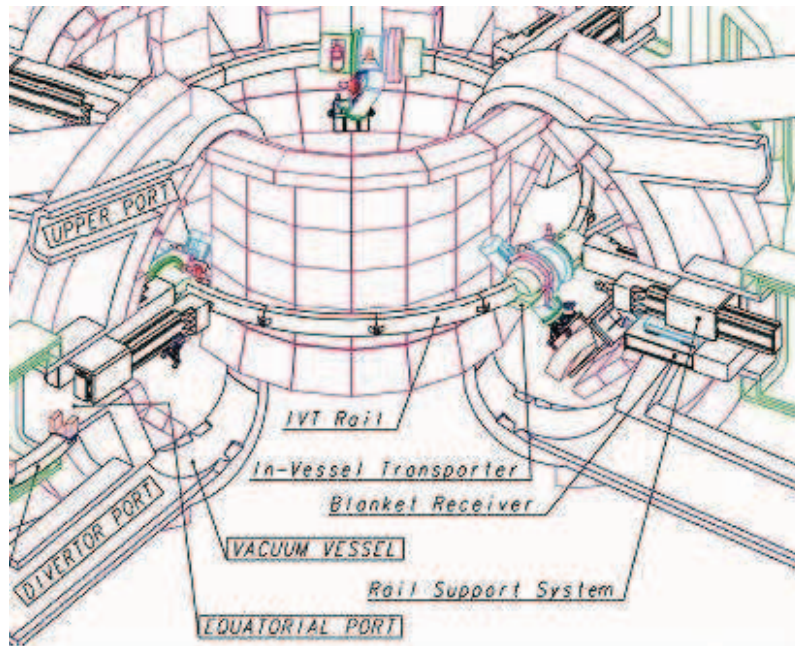


**Figura 9.11.** Vista general de la instalación IVT de Japón. El edificio mide más de 30 m de largo y 10 m de alto. El semicírculo de la fotografía es el carril del IVT de unos 12 m de diámetro<sup>146</sup>.



**Figura 9.12.** Transportador interno de la cámara de vacío<sup>146</sup>

<sup>146</sup> 'Overview of ITER Remote Handling'; ESC04-001 / ITA 23-28 Task Motivation , ITER IDM, Remote Handling and Assembly Engineering Support (277VHR\_v1\_0), Appendix 1-1 - Overview of ITER RH.pdf ; Dr. J. D. Palmer ; 2007



**Figura 9.13.** Representación esquemática del sistema del transportador interno de la cámara de vacío que operará en el interior del toroide de ITER<sup>146</sup> y que se ensaya en la instalación IVT de Japón.

#### 9.4. Equipamiento previsto

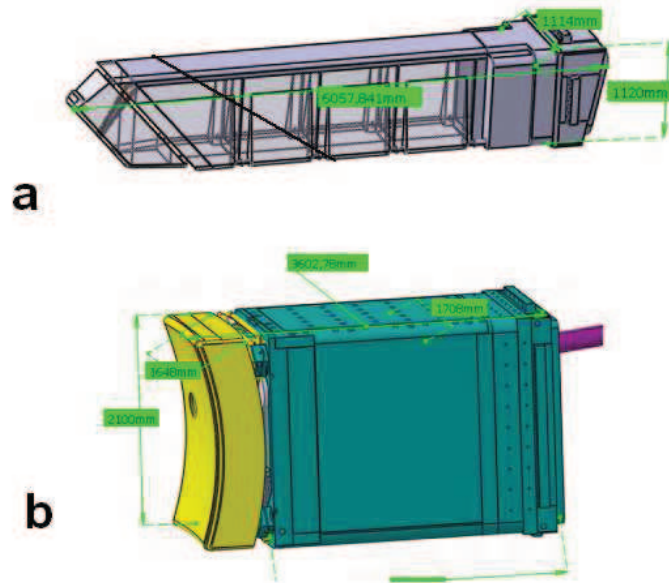
El equipamiento del Área ATMR de *TechnoFusión* vendrá definido en función de las necesidades de los distintos proyectos que en él se desarrollen. Para poder estimar un equipamiento mínimo con el que dotar al Área se han considerado distintas actividades relevantes en tecnologías de fusión y que actualmente no están incluidas en ninguna otra instalación como son:

##### (a) Operaciones de mantenimiento remoto:

Se necesita una nave de experimentación donde se manipularán prototipos como:

- Puertos de diagnósticos (*Diagnostic Port Plug, DPP*) de ITER.
- Módulos de ensayo del manto reproductor (*Test Blanket Modules, TBM*) de ITER.
- Módulos de irradiación de IFMIF.

Para la realización de un gran número de actividades relacionadas con las tareas mencionadas y con otras que pudieran surgir en el marco de actividades del Área ATMR, será necesario incluir un puente grúa de desplazamiento controlado que permita mover los elementos necesarios entre el almacén y la nave de experimentación y a través de las áreas de trabajo de la nave experimentación. Hay que tener en cuenta que los DPP tienen pesos aproximados de 20 toneladas (en el caso de los *Port Plugs* Superiores) y hasta 45 toneladas (en el caso de los *Port Plugs* Ecuatoriales) (ver Figura 9.14).



**Figura 9.14.** Dimensiones básicas de los Port Plug superior (a) y ecuatorial (b)

Por otro lado, debe dotarse a la instalación del Área ATMR con robots manipuladores de uso general, así como sistemas sensoriales y de control de éstos. La zona de almacenaje deberá disponer de sus propios sistemas. En esta zona además de la grúa para el transporte de los elementos de mayor tamaño (DPP, TBM), será necesario disponer de robots y sistemas auxiliares para el transporte y almacenaje de piezas de diversos tamaños y pesos.

(b) Homologación de equipos de MR bajo irradiación.

El Área ATMR requerirá también de una sala de irradiación para realizar la validación, certificación y caracterización de los equipos de manipulación remota bajo radiación *gamma*. La irradiación de tales equipos se llevará a cabo en una nave/sala de irradiación mediante el acoplo con el acelerador de electrones que estará disponible para dar servicio a diferentes Áreas de experimentación.

A continuación se describen en detalle las actividades mencionadas:

## 9.4.1. Operaciones de manipulación remota

### 9.4.1.1. Manipulación Remota de los *Port Plugs* de diagnóstico de ITER

Los Puertos de Diagnóstico (*Diagnostic Port Plugs*, DPP) contienen los equipos de diagnóstico necesarios para controlar, optimizar y evaluar los plasmas en ITER. De los 18 puertos de diagnósticos superiores (*Upper Port Plug*, UPP) de ITER, 12 disponen de equipos de diagnósticos, al igual que 10 de los 18 Puertos de diagnóstico ecuatorial (*Equatorial Port Plug*, EPP)<sup>147</sup>.

Las características más importantes de los UPP son (ver detalle en Figura 9.15):

- Peso aproximado: 20 T.
- Dimensiones: (6.1 x 1.1 x 1.1) m.
- En muchos casos tienen un *Central tube* o tubo central para situar elementos de diagnóstico. Estos tubos se instalarán en el UPP ayudándose de raíles guía.

En general, la alternativa preferida es la apertura de los UPP por la parte superior para extraer los módulos de diagnóstico. Sin embargo, existen alternativas de apertura por la parte inferior del UPP que, según las ideas más recientes conceptuales, se rotarán respecto a un eje horizontal y se accederá verticalmente desde arriba a la parte inferior del UPP.

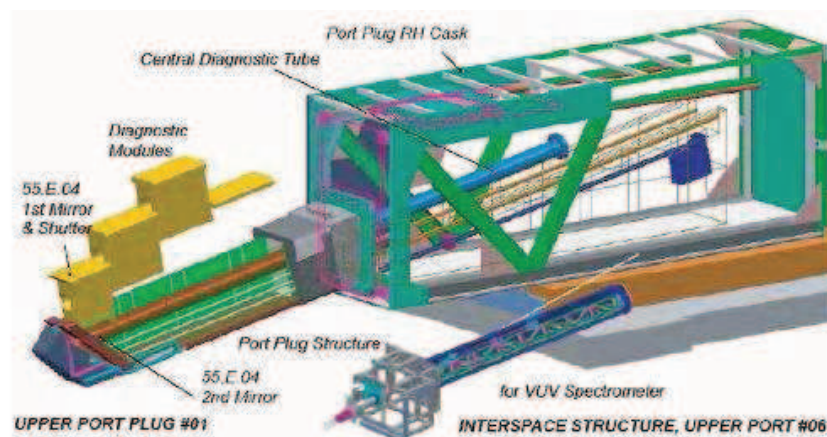


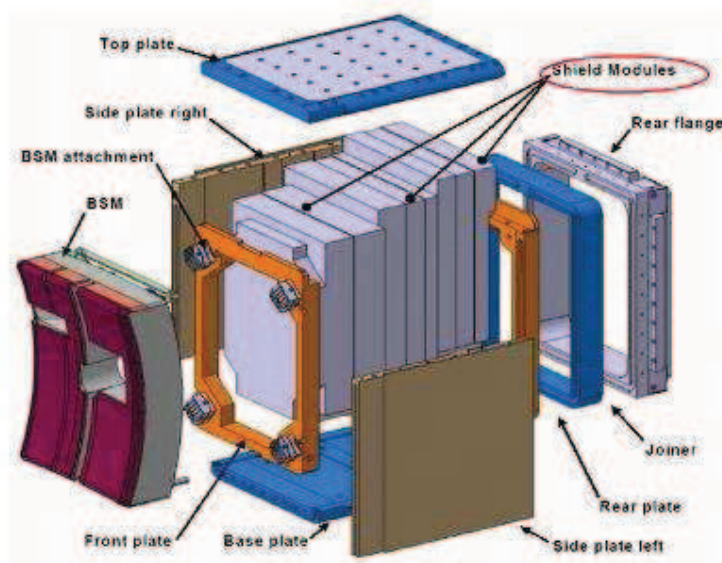
Figura 9.15. Detalle de un UPP de ITER.

<sup>147</sup> "Preliminary data for ITER Hot Room RH facilities in TechnoFusión"; CI-TF-RHSF-002 ; V. Queral ; March 2008.



Las principales características de los EPP (Figura 9.16) son:

- Peso aproximado: hasta 45 T
- Dimensiones: (3.6 x 1.7 x 2.1) m.
- En los EPP hay módulos estructurales independientes que permiten reemplazar parte de los componentes de diagnóstico. Contienen componentes delicados (espejos, guías de ondas, detectores,...).
- Normalmente los módulos de diagnóstico se extraerán por arriba.



**Figura 9.16.** Detalle de un EPP de ITER.

Algunos módulos de diagnóstico dentro de los EPP son accesibles al quitar el BSM (*Blanket Shield Module*). Los BSM, son las partes de los EPP situadas enfrente del plasma y que tienen las perforaciones adecuadas para permitir la emisión/recepción de señales. Su peso aproximado es de 13 T y sus dimensiones de 2.1 x 1.65 x 0.5 m. Los BSM se anclarán al EPP por un sistema de pernos u otro método similar.

En muchos casos las tareas de mantenimiento de los DPP consistirán en la sustitución de componentes o subcomponentes. Generalmente estos subcomponentes son montajes modulares pre-comprobados y pre-alineados que se insertan y se sustituyen, no se reparan online. Algunos de estos subcomponentes son: telescopios, espejos, actuadores mecánicos, etc.

Las tareas consideradas a realizar son:

- Extracción de los *Port Plugs* de la cámara de vacío (con las operaciones asociadas).

- Transporte del contenedor hasta el edificio *Hot Cell*.
- Tareas de mantenimiento en el *Hot Cell* (que engloban múltiples subtareas complejas de desmontaje y montaje de partes y componentes, soldadura, corte, inspección).
- Transporte del contenedor hasta la cámara de vacío.
- Inserción de los *Port Plugs* en la cámara de vacío.

Según esto las operaciones previsibles de manipulación remota con los DPP serán:

- Elevación y movimiento de *Port Plugs*, Módulos, sub-módulos, BSM y otros elementos que sea necesario reemplazar.
- Atornillar/desatornillar.
- Corte de tuberías y otros elementos.
- Soldadura de tuberías.
- Movimiento y ajuste de elementos de diagnóstico.
- Reemplazamiento de módulos, sub-módulos y otros elementos dañados.

En el mantenimiento remoto de los DPP se incluyen tareas relacionadas con la extracción de los DPP de la cámara de vacío y su fijación al *In-Cask Handling Equipment* y con las acciones inversas de separación del *In-Cask Handling Equipment* e inserción de los DPP en la cámara de vacío.

El *In-Cask Handling Equipment* estará formado fundamentalmente por algún sistema tractor para la elevación y la colocación o retirada de la carga en el *Cask* y uno o dos manipuladores para la ejecución de tareas como la extracción y colocación del sellado, el corte y extracción de las tuberías de refrigeración y su conexión de nuevo por soldadura, así como la inspección de las soldaduras.

Los diversos diseños de los DPP presentados hasta el momento hacen difícil establecer a priori las necesidades concretas de equipamiento. Estos sistemas deben estar equipados con herramientas de atornillado, corte y soldadura, etc., o poder equiparse con ellos mediante un sistema de cambio de garras de prensión y de herramientas para adecuarse a la tarea concreta.

Las tareas de manipulación remota de los DPP en la *Hot Cell* requieren de al menos un manipulador en el interior de la sala para abrir y retirar las tapas de los *Port Plugs*. Este sistema puede ser el mismo que para operar con los TBM en la misma sala. Dadas las dimensiones de los elementos a manipular (los UPP tienen una longitud superior a los 6 m.) sería conveniente extender el área de trabajo del manipulador por medio de raíles. Se necesitará el diseño de sistemas auxiliares de sujeción para las tapas durante las operaciones de apertura y sellado que realizará un manipulador. El transporte de las tapas hacia una zona de almacenaje durante el

tiempo de manipulación de los subcomponentes y equipos de diagnóstico del DPP, requerirá de sistemas específicos.

Los módulos de diagnóstico del interior de los DPP pueden extraerse por arriba. Para esta tarea se requerirá de un sistema robotizado con capacidad de carga de hasta 10 toneladas (peso de los módulos de apantallamiento de un EPP<sup>148</sup>), el espacio de separación es de unos 5 mm, lo que requiere de una importante precisión en los movimientos, aunque existirán guías de posicionamiento de los módulos. Para retirar y mover el BSM de los EPP será necesario un sistema capaz de mover aproximadamente 13 T. Teniendo en cuenta ambas cosas, se debería pensar en un sistema robotizado capaz de mover cargas superiores a las 13 T y resoluciones del orden de milímetros. Este sistema debe ser auxiliado por un manipulador con herramientas para (des)atornillar y cortar y/o soldar para la extracción del BSM.

Todas las tareas relativas al montaje o desmontaje de los equipos de diagnóstico dentro del DPP, así como tareas de mantenimiento que puedan realizarse sin sacar los módulos de diagnóstico, requerirán con toda probabilidad del diseño de sistemas robotizados específicos.

Para la manipulación remota de equipos complejos en los DPP en los que es necesario llevar a cabo un gran número de operaciones de precisión (alineamiento de espejos, cámaras, dispositivos ópticos,...) se requerirá de sistemas de realimentación visual y dispositivos ópticos para la teleoperación de un brazo manipulador ligero que desarrolle este tipo de tareas.

Otra tarea que podría preverse es la inspección de los *Port Plugs* después de las operaciones de manipulación remota. Esto se llevaría a cabo en una “estación de medida” para medir y comprobar el posicionamiento de algunos componentes críticos de los *Port Plugs*. En esta estación de medida se podrá poder hacer una inspección visual completa de las áreas críticas de los DPP.

Las estaciones de medida y de inspección por visión deberán estar equipadas con equipos automatizados de visión y/o telemetría láser, fijos y teleoperados. Algunos podrán situarse en posiciones fijas preestablecidas. También será necesario dotar a estas estaciones de algún equipo móvil que sea desplazado por un brazo robotizado. La estación de medida e inspección sería específica para tales operaciones enfocadas a ITER. Sin embargo, un mínimo equipo de inspección y metrología deberá ser parte integrante de los equipos permanentes del Área ATMR de *TechnoFusión*.

#### **9.4.1.2. Manipulación Remota de los *Test Blanket Modules* de ITER**

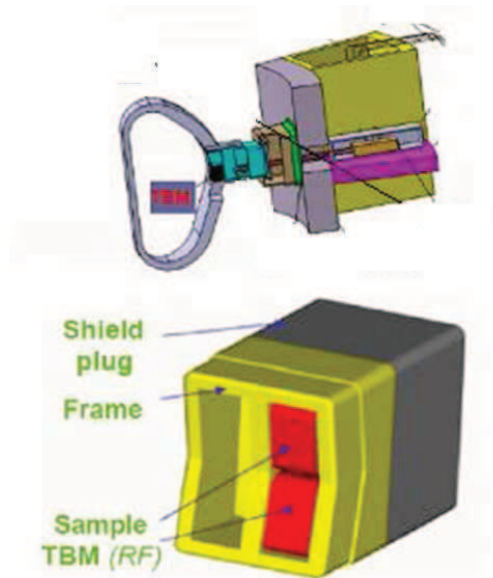
Los TBM (Figura 9.17) son componentes de ITER para el ensayo del *Breeding Blanket* (“manto fértil” cuya misión es producir tritio) para DEMO y otros reactores de fusión. Existen dos TBM en ITER en cada marco de acero refrigerado por agua de un *Port-Plug* que se situarán en 3 EPP. En total se pretende probar 6 TBM en ITER.

---

<sup>148</sup> “Technical Specification for the Diagnostic Equatorial Port Plug”; C.I.Walker ; ITER\_D\_22FNKA Draft 11 Nov 2005

Las principales características de estos TBM son:

- Peso aproximado: 2 T
- Tamaño aproximado: (1.7 x 0.54) m



**Figura 9.17.** Estructura de los TBM que se emplearán en ITER.

En la mayoría de los casos la operación a realizar con los TBM será su reemplazo para lo cual es necesario llevarlos a la *Hot Cell*.

Las tareas consideradas a realizar son:

- Mantenimiento de los TBM en la *Hot Cell*:
  - Llegada del contenedor.
  - Corte y desconexión de los tubos y conectores eléctricos del TBM.
  - Extracción del TBM.
  - Desplazamiento a la zona de trabajo.
  - Extracción del TBM del EPP.
  - Desplazamiento a la zona de detritación de los *blankets*.
  - Colocación de un nuevo TBM.

- Soldadura y conexión de los tubos y conectores eléctricos del TBM.
- Prueba de estanqueidad del EPP.
- Operaciones de manipulación remota a realizar con los TBM:
  - Elevación y movimiento de los TBM que vayan a reemplazarse.
  - Desensamblado de las partes que lo componen, sustitución de partes y montaje.

Los TBM deben desconectarse de la sujeción del *Port Plug* y ser extraídos e igualmente colocado el nuevo TBM.

Además del robot para las tareas de conexión y desconexión (soldadura y corte) debe haber un sistema robotizado de manipulación para manejar los dos TBMs del módulo y su colocación en los útiles que van a estudiarlo, añadido al robot de trabajo para la desconexión.

Este sistema de extracción puede llevar un manipulador para la carga y descarga de los TBM que intervendrá tanto en la transferencia entre el módulo de transporte y el sistema de extracción como entre éste y el dispositivo de recepción en la *Hot Cell*.

#### **9.4.1.3. Manipulación Remota de los Módulos de Irradiación de IFMIF**

En IFMIF se desarrollarán ensayos para los materiales candidatos a ser utilizados en la construcción de plantas de fusión. Su objetivo es estudiar el comportamiento de los materiales en las condiciones de un reactor de fusión y generar una base de datos de materiales para el diseño del reactor DEMO. En la Figura 9.20 se muestra un esquema de la zona de irradiación de IFMIF.

Debido a la radiación, el mantenimiento e inspección de los materiales y componentes de IFMIF y el manejo de las muestras para los exámenes post-irradiación deben realizarse de forma remota.

De todas las posibles tareas de manipulación remota a realizar en IFMIF la que más condicionantes impone al Área ATMR de *TechnoFusión*, debido al peso y tamaño de las piezas, es el manejo de los módulos de irradiación. Por ello hay que estudiar estas tareas para dimensionar el edificio.

En la Figura 9.20 se distinguen: dos VTA (*Vertical Test Assembly*) cuya función es situar las muestras para irradiación de alto y medio flujo, un VIT (*Vertical Irradiation Tube*), conjunto de tubos empleados para insertar cápsulas de prueba en la región de bajo flujo, y tapas móviles (*Test Cell Covers*) de la *Test Cell*, que soportan los VTAs y que tienen que retirarse para acceder a la celda completa.

De forma general las tareas consideradas a realizar en IFMIF<sup>149</sup> son:

- Extracción del módulo de irradiación de la *Test Cell*.
- Desmontaje y tratamiento de las muestras.
- Inserción del módulo de irradiación en la *Test Cell*.

Por ello, en el mantenimiento remoto de los módulos de irradiación de IFMIF se establecen las siguientes tareas de manipulación remota:

- Desconexión de los conectores y bridas en la parte superior de los VTAs.
- Izado de los módulos de irradiación.
- Extracción del *Back Plate* (pieza que soporta alta radiación neutrónica) de la *Test Cell* en caso de que sea necesario.
- Inserción del *Back Plate* en la *Test Cell*.
- Inserción de los módulos de irradiación

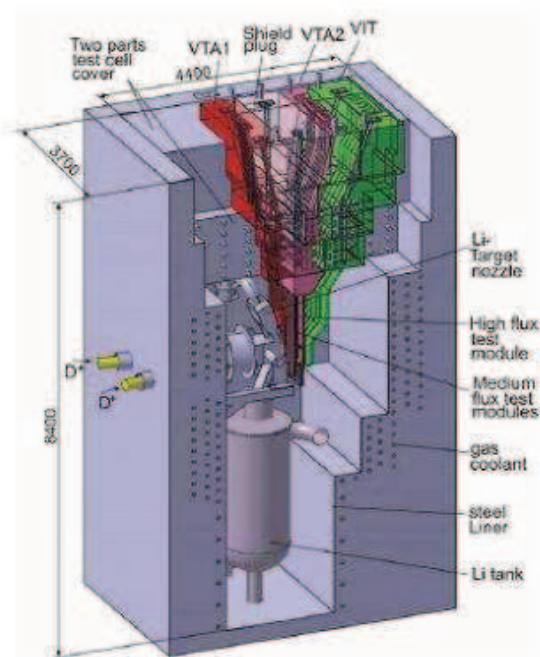


Figura 3: Test Cell de IFMIF

Figura 9.20. Esquema de la zona de irradiación de IFMIF.

<sup>149</sup> "Preliminary data for IFMIF remote handling facilities in TechnoFusión"; CI-TF-RHSF-001; V. Queral; November 2007

Para la realización de estas operaciones de forma remota será necesario emplear, al menos, un robot manipulador tele-operado, que puede tener el elemento final (*end-effector*) intercambiable para poder realizar cada operación con la herramienta correspondiente. Si los elementos a manipular tienen propiedades (peso, tamaño, forma) muy diferentes es posible tener que emplear diferentes robots en cada caso. Al menos para la elevación, extracción y posterior introducción de los VTA y VIT será necesario un sistema robotizado tipo grúa especial de alta precisión y con posibilidades de inclinación y rotación de la pieza respecto a los tres ejes espaciales.

#### **9.4.1.4. Resumen de los sistemas de manipulación adecuados para la mayoría de las operaciones de manipulación**

El Área ATMR de *TechnoFusión* deberá disponer desde el inicio de un mínimo de sistemas de manipulación generales para poder realizar tareas de validación de I+D, independientemente de la tarea específica que ha sido asignada al Área. Además el sistema mínimo será necesario para competir internacionalmente con otros laboratorios que ya disponen de algún tipo de instalaciones robotizadas de ensayo y validación para fusión.

La dificultad de abstraer y ponderar las necesidades para actividades futuras, muchas de las cuales todavía se desconocen, es complejo y sólo puede estimarse el orden de magnitud. En base a los tres ejemplos significativos analizados anteriormente y considerando las limitaciones presupuestarias y los objetivos estratégicos del Área ATMR de *TechnoFusión* se pueden definir, como punto de partida, una estimación de las instalaciones mínimas necesarias sin las cuales los objetivos básicos de esta área de experimentación no se podrían cubrir y sería difícil poder competir internacionalmente para lograr los primeros grandes proyectos de desarrollo y suministro para el ITER. Esta estimación es la siguiente:

- a) Un puente grúa ('Grúa Principal') de la capacidad suficiente (carga requerida entre 20 y 40 T a decidir en futuros estudios) y alta precisión de posicionamiento dotada para rotación de la pieza respecto el eje vertical y de ligera o notable rotación de la pieza respecto los dos ejes horizontales. Además deberá estar dotada de sensores de posicionamiento absoluto de precisión adecuada para las tareas de mayor precisión prevista (milímetros o incluso menos, logrado por medios telemétricos láser o similares de referencia absoluta) y de pesaje y desequilibrio de carga. El tipo de grúa deberá ser el más común y significativo en las instalaciones ITER e IFMIF, para abarcar la mayor parte de experimentos sin la compra de material específico.
- b) Un sistema para el transporte y posicionamiento de los robots manipuladores en distintas áreas y alturas de la instalación que se denominará "Nave de Experimentación con Grandes Prototipos" por medio de raíles y/o brazos articulados y/o grúas plumas y/o sistemas telescópicos verticales/horizontales.
- c) Varios robots manipuladores de dos capacidades de carga diferente, para cargas máximas de unos 100 - 500 kg y para cargas máximas de unos 10 - 50 kg. Se deberán considerar dos tipos de robots manipuladores: uno de tipo comercial (de alta fiabilidad y reconocido por los grupos internacionales) y varios robots manipuladores no comerciales principalmente desarrollados por

las universidades y Centros de investigación del entorno de *TechnoFusión* (GIAs<sup>150</sup> y empresas relacionadas). Estos últimos, por tanto, deben estar dotados de un software abierto, flexible, con prestaciones mecánicas abiertas y modificables, adecuados para la I+D realizada por el entorno de *TechnoFusión*. El mínimo número de robots necesario será: un robot comercial dotado de dos brazos y carga mínima 10 kg (deseable carga mínima 50 kg) y un mínimo de dos robots no comerciales dotados del número de brazos que se requiera, uno al menos de alta carga máxima.

- d) Un sistema de visión por cámaras remotas, un sistema de control y tele-manipulación fijo y otro a pie de nave de menores prestaciones. Además un sistema de interacción en tiempo-real hombre-modelo virtual.
- e) Computadores de alta potencia gráfica para realidad virtual y software específico.

#### 9.4.2. Nave de Experimentación Bajo Irradiación

El Área ATMR de *TechnoFusión* requerirá una sala de irradiación para efectuar la validación, certificación y caracterización del equipamiento de manipulación remota bajo radiación.

Estos equipos incluyen servomanipuladores, grúas, máquinas apiladoras, brazos de manipuladores, postes telescópicos, brazos articulados y otros que serán utilizados en ITER, IFMIF, DEMO y reactores de fusión comerciales. El objetivo de la instalación es irradiar dichos dispositivos íntegros y, si no es posible debido a restricciones de espacio, se llevará a cabo la irradiación de partes significativas de los equipos. La capacidad de irradiar partes enteras de los robots de manipulación remota es la principal singularidad de la instalación.

La irradiación de tales instrumentos se realizarán en una nave llamada “Nave de Experimentación Bajo Irradiación” (NEBI) donde existirá radiación *gamma* gracias al acoplo de esta sala con el acelerador de electrones que se describe en la sección del Área de Irradiación de Materiales.

En este sentido, es imprescindible resaltar los estudios realizados para diseñar una placa de espesor óptimo que permitirá emitir grandes cantidades de radiación *gamma* a partir de electrones con una energía de 10 MeV. Los cálculos detallados se describen a continuación:

##### 9.4.2.1. Simulaciones para la optimización del espesor de la placa y volumen máximo de irradiación

El objetivo básico es realizar una estimación del volumen máximo de irradiación sobre el dispositivo de manipulación remota a evaluar. Para ello es necesario diseñar una lámina de metal (en este caso W) que emita radiación *gamma* bajo la incidencia de un haz de electrones de energía 10 MeV.

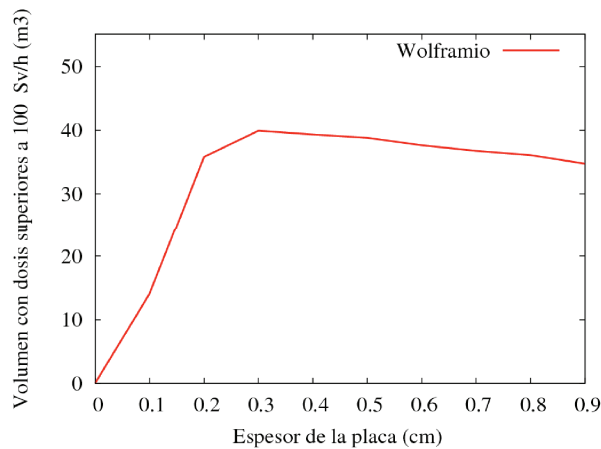
---

<sup>150</sup> Los GIAs son los Centros de Investigación Asociados a TechnoFusión que configuran su apoyo tecnológico y su entorno directo.



### (I) Optimización de los espesores de la placa

Para calcular el espesor óptimo de la placa de W maximizando la radiación *gamma* en la Nave NEBI, se ha realizado una serie de simulaciones con un haz sin divergencia de 0.5 cm de radio. La Figura 9.21 muestra la variación del volumen de irradiación obtenido conforme varía el espesor de la placa. Se puede observar que el valor óptimo se encuentra entorno a los 0.3 cm. No obstante, utilizando un espesor tan pequeño hay un porcentaje significativo de la dosis que será producido por electrones que atraviesan la lámina. Para mitigar este efecto, y teniendo en cuenta que la absorción de fotones producida al incrementar el espesor de la placa es muy pequeña, se utilizará un espesor de 0.6 cm.

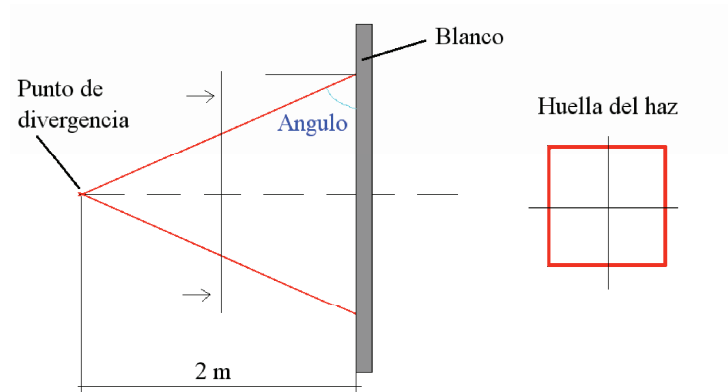


**Figura 9.21.** Evolución del volumen de irradiación con el espesor de las placas.

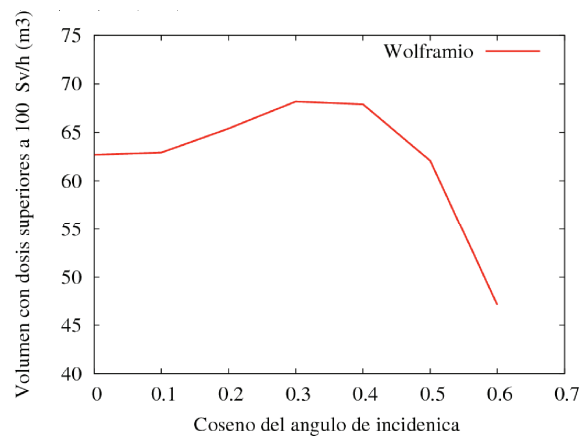
### (II) Haz realizando un barrido cuadrado

La Figura 9.22 muestra la geometría utilizada en el modelo de Fluka con el que se han realizado las simulaciones. Se considera una placa de radio infinito y espesor variable sobre la que incide un haz de electrones divergente. El punto de divergencia se sitúa a 2 m de la lámina, modificando la fuente de partículas para que dé lugar a una huella cuadrada sobre la misma. Esta forma de huella se utiliza para poder usar dos campos electrónicos en los barridos sin que esto aumente la complejidad de la instalación. En apartados posteriores se estudiarán otras configuraciones de haz.

La Figura 9.23 muestra la evolución del volumen de la habitación cuya dosis está comprendida entre 100 y 500 Sv/h conforme varía el coseno del ángulo de incidencia de los electrones. Tal como se aprecia en dicha figura, entre 0 y 0.4 la variación del volumen de irradiación es muy suave, alcanzando su valor máximo para 0.3. Dado que el volumen de irradiación con cosenos del ángulo de incidencia comprendidos entre 0.3 y 0.4 es muy similar, se considerará como valor óptimo aquel que dé lugar a una radiación más homogénea.

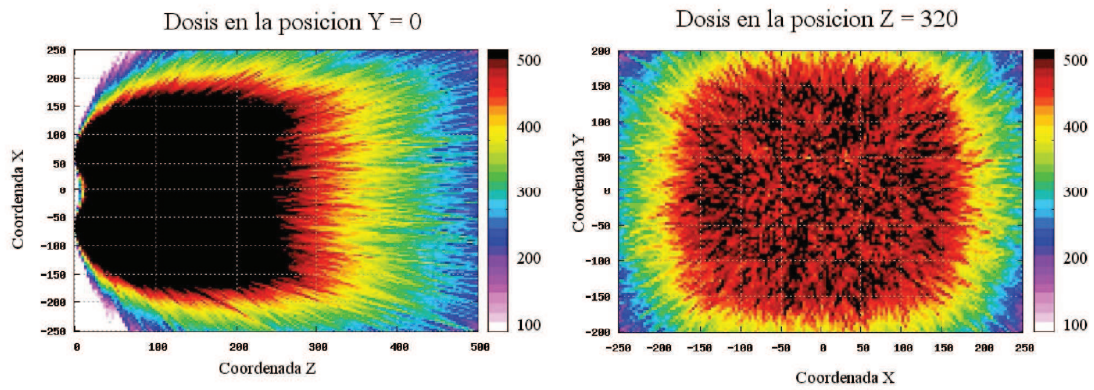


**Figura 9.22.** Modelo de simulación de la geometría adoptada por los cálculos de los espesores de la placa.

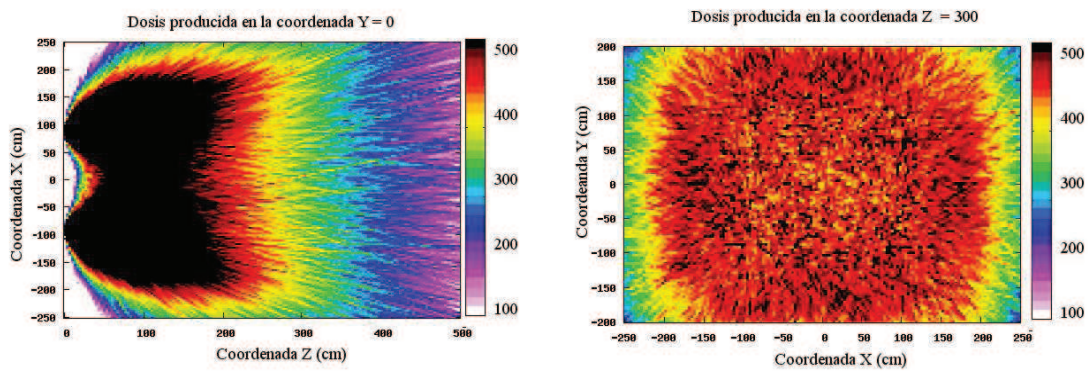


**Figura 9.23.** Volumen irradiado con dosis entre 100 y 500 Sv/h para un haz que barre el perímetro de un cuadrado

Las Figuras 9.24 y 9.25 muestran la distribución de la radiación en la estancia. Los resultados obtenidos al variar el ángulo de incidencia de los neutrones. Se puede observar como al aumentar ligeramente el ángulo (cos 0.3 a cos 0.4) se consigue homogeneizar de forma considerable la dosis en la nave.



**Figura 9.24.** Dosis producida por electrones de 10 MeV incidiendo sobre una lámina de W. Coseno del ángulo de incidencia de 0.3

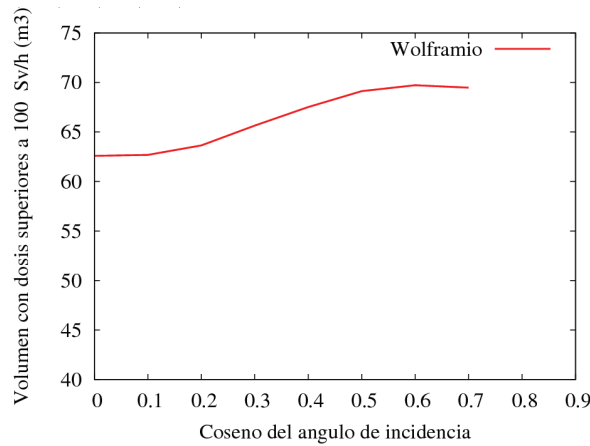


**Figura 9.25.** Dosis producida por electrones de 10 MeV incidiendo sobre una lámina de W. Coseno del ángulo de incidencia de 0.4.

**(III) Haz realizando un barrido en la superficie de un cuadrado**

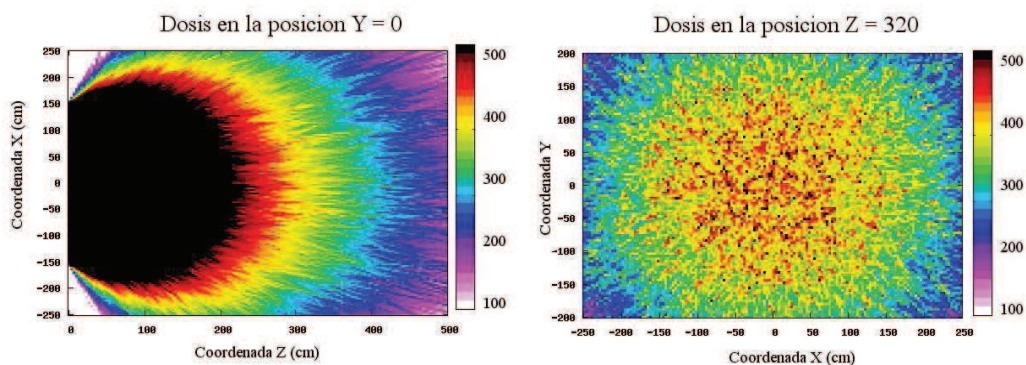
A continuación se evalúa el volumen de irradiación obtenido al utilizar un haz que realice un barrido en toda la superficie del cuadrado descrito en la Figura 9.22.

La Figura 9.26 muestra la evolución del volumen total de irradiación variando el ángulo de incidencia de los electrones. Se puede apreciar como el valor óptimo se consigue con un valor del coseno de 0.6.

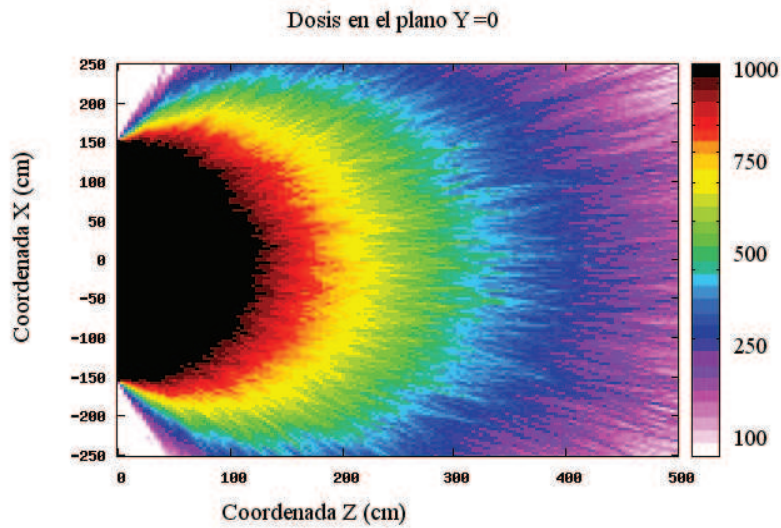


**Figura 9.26.** Volumen irradiado con dosis entre 100 y 500 Sv/h para un haz que barre el área de un cuadrado.

La Figura 9.27 muestra la distribución de la dosis para un ángulo de incidencia de los electrones con un coseno de 0.6. En estas condiciones la distribución es muy homogénea, pero de valores inferiores a los representados en la Figura 9.25, de lo que deduce que con esta configuración se obtiene un volumen ligeramente superior al de los casos anteriores, pero con valores de dosis más reducidos. Como posible ventaja adicional de la irradiación en superficie se presenta la Figura 9.28. En ella se puede apreciar que el volumen que cubre la fuente si se considera un rango de irradiación entre 100 y 1000 Sv/h abarca prácticamente todo el volumen de la habitación, por lo que se recomienda esta distribución.



**Figura 9.27.** Dosis producida por electrones de 10 MeV incidiendo sobre una lámina de W. Coseno del ángulo de incidencia de 0.6.



**Figura 9.28.** Dosis producida en el rango de 100 y 1.000 Sv/h por electrones de 10 MeV incidiendo sobre una lámina de W. Coseno del ángulo de incidencia de 0.6.

#### (IV) Condiciones recomendadas en función de los resultados de simulación

A modo de resumen de los resultados expuestos en los apartados anteriores se presenta la Tabla 9.2, en la que se recogen los parámetros optimizados con objeto de maximizar el volumen final con dosis comprendidas entre 100 y 500 Sv/h.

**Tabla 9.2.** Resumen de los resultados

<b>Material irradiado</b>	W
<b>Densidad</b>	19.25 g/cm <sup>3</sup>
<b>Coseno del ángulo de incidencia</b>	0.6
<b>Huella del haz</b>	Superficie cuadrada 1.5x1.5 m <sup>2</sup>
<b>Espesor de la placa</b>	0.6 cm
<b>Radio del haz</b>	0.5 cm
<b>Volumen total</b>	74.80 m <sup>3</sup>
<b>Tamaño de la sala</b>	100 m <sup>3</sup>

#### 9.4.2.2. Estimaciones de espacio y dosis de radiación desde el punto de vista de los robots a irradiar

Para estas estimaciones hay que tener en cuenta que el tamaño de la Nave NEBI y la dosis de irradiación vendrán limitadas en función de las prestaciones impuestas por el diseño del acelerador de electrones y de la optimización de la placa de incidencia como se ha explicado anteriormente. A continuación se realiza una estimación del mínimo espacio requerido para la zona de irradiación de equipos y la estimación de un valor razonable de dosis de irradiación, que dependerán de críticamente de los siguientes parámetros:

- a) El mercado mundial de ensayos y certificación de manipuladores para fusión y de la participación que se desee que la Nave NEBI de *TechnoFusión* tenga en dicho mercado. En las páginas siguientes sólo se realiza una estimación muy preliminar debido a la indeterminación de los mercados futuros.
- b) El tamaño de los robots para manipulación remota (incluyendo manipuladores, grúas, brazos articulados, etc.).
- c) La tasa de irradiación de los robots manipuladores (en unidades de robots por unidad de tiempo, por ejemplo, cuatro robots irradiados en un año).
- d) La dosis recibida por los equipos manipuladores en la Nave NEBI depende del tamaño de la nave y la potencia del acelerador.
- e) Los robots en la primera fila de irradiación recibirán una mayor radiación que los de la segunda fila. La absorción de la radiación depende del tamaño, forma y material de los robots que actúan como pantalla en la primera fila.

#### 9.4.2.3. Mercado de irradiación de robots manipuladores

En ITER, se estima que el número de robots trabajando en zonas de alta radiación está entre 50 y 100. Esta cifra incluye a los servomanipuladores, los puente grúa, otros tipos de grúas, máquinas apiladoras, postes telescópicos y brazos articulados, y *Plasma Facing Component Transporters* (PFCT) en la *Hot Cell*; *In-vessel Transporter* (IVT) que trabaja en el interior de la cámara de vacío, robots para la inspección del interior de la cámara de vacío y *del CMM* y *Second Cassette End Effectors* (SCEE) en los *Port Plugs* para la sustitución de los divertores.

En IFMIF, el número total de robots manipuladores en la instalación completa se estima entre 7 y 10 unidades, incluyendo grúas, manipuladores y brazos articulados.

En DEMO y los futuros reactores el número de robots manipuladores que tendrá que validarse y certificarse será inmenso, pero las instalaciones para estas tareas se considerarán en una futura expansión de la Nave NEBI debido al largo plazo y a las grandes indeterminaciones existentes.

Las plantas nucleares de fisión necesitan también de manipuladores bien validados y fiables. Aún encontrándose el foco atención de *TechnoFusión* en la I+D para fusión, podrían realizarse algunas actividades al margen en otros campos diferentes a la fusión. Alrededor de un 30 % del total de actividades en la Nave de Experimentación Bajo Irradiación de *TechnoFusión* podría considerarse en tales sectores.

*Elementos no incluidos en la lista superior de equipos a ensayar:*

- Las piezas de repuesto de robots y componentes.
- Los mecanismos y manipuladores que se encuentran dentro de los *Casks* de ITER.
- Otros robots que trabajen bajo condiciones de radiación menores que 0.1-1 Sv/h no han sido incluidos dado que los ensayos de validación/certificación pueden realizarse muy rápidamente o evitados.
- Las herramientas para manipulación remota no han sido incluidas ya que su tamaño es menor. Sin embargo el número de herramientas será relativamente elevado. Se estima entre 200 y 1000 herramientas para manipulación remota en ITER pueden ser estimadas.

*Estimaciones e hipótesis de trabajo:*

Se ha realizado una estimación del total de robots a ser utilizados en la Nave NEBI tomando las siguientes hipótesis de trabajo:

- Hay dos robots del mismo tipo en las instalaciones y sólo uno de ellos necesita ensayo/certificación. El 50% de alrededor de 160 robots (ITER+IFMIF+ otros no para fusión) resulta 80 robots.
- Las piezas de repuesto no necesitan ensayos o certificaciones.
- La mayoría de los robots manipuladores considerados anteriormente necesitarán ser desarrollados y validados durante la fase de construcción de ITER, es decir, desde el presente hasta alrededor del año 2.020. Se toma un valor redondeado de 10 años.
- Una participación del 50% del total del mercado mundial de servicios de irradiación se considera para la Nave NEBI de *TechnoFusión*. Alrededor de 40 robots en 10 años es el número de robots considerado para *TechnoFusión*.
- En conclusión, una estimación aproximada de 4 robots manipuladores por año de un tamaño promediado de robot debería poder ser probado y certificado en la Nave NEBI de *TechnoFusión* para contribuir de forma significativa a las necesidades mundiales en un futuro próximo.

#### **9.4.2.4. Tamaño medio de los robots**

El término 'Robot Manipulador' incluye equipos de manipulación remota muy diferentes entre si, tal como se ha citado previamente: servomanipuladores, grúas, máquinas apiladoras, postes telescópicos, brazos articulados, etc. Su tamaño varía considerablemente pero los robots manipuladores más voluminosos son los más relevantes para el estudio.

Se considera una envolvente del robot incluyendo un espacio para permitir un movimiento parcial del robot manipulador. La envolvente para los pocos

manipuladores de gran tamaño será de (4 x 4 x 3) m para las máquinas apiladoras, para parte del IVT teniendo el brazo en posición retraída y para el PFCT. La envolvente para los servomanipuladores grandes de ITER será aproximadamente de (1.5 x 1.5 x 1.5) m.

#### 9.4.2.5. Dosis estimadas de radiación gamma después de la parada en diversas áreas de ITER e IFMIF

##### (I) En ITER <sup>151</sup>:

- Dentro de la cámara de vacío: alrededor de 7.500 Gy/h 2.8h después de la parada. Los manipuladores no trabajarán dentro de la cámara en tal estado.
- Dentro de la cámara de vacío: alrededor de 500 Gy/h 11.6h después de la parada. Los manipuladores situados dentro trabajarán bajo tal radiación.
- Fuera del *Cask* de ITER: 10 Gy/h 11.6 días después de la parada.
- Alrededor de < 0.5 mGy/h en el volumen más desfavorable entre el blindaje biológico (*bioshield*) y la cámara de vacío. Los manipuladores a trabajar en dicha área no se consideran en este documento para los ensayos bajo radiación.
- Fuera del *bioshield* la dosis de radiación es del orden de algunos microSv/h excepto cerca de algunos conductos.
- En la ITER *Hot Cell*: 155 Gy/h a 1m de la superficie de un *blanket*<sup>151</sup>. Menos de 10 Gy/h puede ser estimado para la mayoría de áreas.

##### (II) En IFMIF:

- Las dosis dentro del volumen más activado, la *Test Cell*, se encuentra en el rango entre 20 a 1000 Gy/h inmediatamente después de la parada. La dosis varía de forma importante con la distancia a los *Test Modules* porque las fuentes de radiación se encuentran relativamente concentradas.

#### 9.4.2.6. Dosis de gammas razonable para el acelerador de electrones y para los robots

Varios estudios muestran que sería posible obtener una dosis entre 100 a 500 Gy/h en un volumen de unos pocos metros cúbicos con un acelerador de una energía máxima de 10 MeV y una corriente máxima de unos pocos mA.

El objetivo es probar los robots manipuladores a una tasa de radiación (Gy/h) 10 veces mayor o más que la dosis recibida en la instalación real porque es

---

<sup>151</sup> Información extraída principalmente de la referencia "DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT: Remote Handling Equipment (DDD 23) Chapter 1, General", N 23 DDD 66 R0.3 ; ITER IDM ; 2004



conveniente reducir los periodos de irradiación a valores prácticos. Sólo en los casos en los que algunos componentes, por ejemplo cámaras, poseen un límite de dosis (Gy/h) relativamente bajo, entonces la dosis se limitará y el proceso de irradiación tendrá que durar más.

Así pues, una dosis de 500 Gy/h en la primera fila de robots en la Nave NEBI de *TechnoFusión* puede considerarse como un primer paso en el diseño.

Se consideran dos categorías de robots debido a las muy diferentes condiciones operativas en ITER y en IFMIF:

- 1) Robot manipuladores críticos: sólo los manipuladores que se encuentran en el interior de la cámara de vacío de ITER recibirán alrededor de 500 Gy/h durante largos periodos de tiempo. Dentro de la cámara de vacío sólo el IVT tiene gran tamaño y se considera medio año de funcionamiento continuo. La dosis integrada recibida por los robots será de alrededor de 2 MGy. Éste es un robot manipulador crítico. Tales tipos de robots serán colocados necesariamente en la primera fila de robots en la Nave NEBI.
- 2) Otros robots manipuladores: la mayoría del resto de robots, que ocuparían un volumen alrededor de 10 m<sup>3</sup> en la Nave NEBI (la forma de los robots permite algo de solapamiento) recibirá una dosis desde 100 a 1 Gy/h. Tales robots necesitarán certificación desde 0.1 MGy a 1 MGy de dosis integrada (las necesidades de los clientes son desconocidas pero 10 años de operación a 10 Gy/h y 10% de carga de trabajo es un punto de partida razonable). La dosis de irradiación en la segunda fila de la Nave NEBI puede ser estimada en 100 Gy/h. El volumen total ocupado por 4 robots será de alrededor de 40 m<sup>3</sup>. Bajo tales condiciones la irradiación media de 4 robots tardará unos 40 días para alcanzar 0.1 MGy/h.

Considerando que el acelerador de electrones se compartirá con otras Áreas de experimentación de *TechnoFusión*, la menor disponibilidad de la Nave NEBI si varios robots con diferentes requerimientos se irradian simultáneamente y el tiempo de arranque y de mejora de los experimentos, entonces podrían irradiarse simultáneamente unos 10 robots medios por año en la segunda fila a 0.1 MGy de dosis integrada. Se requerirá mayor tiempo de irradiación para la segunda fila si se requiere 1 MGy para todos los robots en la Nave NEBI.

Los valores obtenidos son razonables en relación al mercado mundial de irradiación de robots y de aceleradores de electrones considerados para *TechnoFusión*.

#### **9.4.2.7. Conclusión: requerimientos de la Nave de Experimentación Bajo Irradiación**

- El *volumen efectivo* mínimo absoluto requerido son (4 x 4 x 3) m. Un *volumen efectivo* de (5 x 5 x 4) m proporcionará un rendimiento superior y mayores posibilidades de irradiación pero existe doble volumen irradiado. NOTA: El volumen efectivo es el volumen donde realmente los robots pueden ser instalados y probados.
- La dosis de *gammas* en la primera columna de robots será como mínimo 500 Gy/h. La dosis en la segunda fila será como mínimo 100 Gy/h.

- Se deberá poder concentrar el barrido del haz de electrones en un área relativamente reducida ( $4 \text{ m}^2$  o menos) de la pared generadora de rayos *gamma* para conseguir hasta 2.000 – 3.000 Gy/h en un volumen pequeño dentro de la Nave NEBI. Tal característica se utilizaría ocasionalmente para certificaciones especiales.

Otros requerimientos a tener en cuenta son los siguientes:

- Se requieren fijaciones sobre las paredes, estanterías, techo y suelo para soportar los robots manipuladores a irradiar.
- Se requieren grúas y máquinas apiladoras para posicionar los robots pequeños y las herramientas de manipulación remota sobre estructuras similares a estanterías.
- Debe suministrarse una alimentación adecuada a los robots. Además, algunas partes de los robots serán validadas bajo condiciones de movimiento de tales robots, es decir, durante la irradiación los robots realizarán los mínimos movimientos necesarios para confiablemente poder validarlos y certificarlos en condiciones similares a las reales. Suministros eléctricos y quizás hidráulicos se necesitan para cada robot. También se requieren conductos para cables de señal.
- Se requiere la instalación de sistemas de comunicación inalámbricos estándar y suficiente flexibilidad para incluir sistemas inalámbricos particulares de cada cliente.
- Se requiere que la nave esté preparada para una futura instalación de un sistema de calentamiento de la atmósfera interior de la sala, de manera que pudiera lograrse una temperatura del aire de hasta  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Se cumplirán todos los requerimientos de seguridad y construcción relativos a las naves/salas que contienen radiación *gamma*.

## 9.5. Capacidad experimental

El Área ATMR de *TechnoFusión* desarrollará sus tareas fundamentalmente en torno a dos grandes áreas de trabajo: *desarrollo de sistemas robotizados específicos y operación y control a distancia (teleoperación)* de los mismos. Estas grandes áreas se pueden concretar en las siguientes líneas:

- Teleoperación de tareas: en comunicaciones, interfases hombre-máquina y control bilateral. Tareas de corte, soldadura, inspección y evaluación no destructiva, ensamblado y desensamblado, medición, etc.
- Robots de grandes prestaciones (dimensiones y esfuerzos), tanto con estructuras paralelas como modulares.
- Percepción de entornos semiestructurados con visión 3D y sensores de fuerza.

- Realidad virtual para representación de entornos virtuales realistas y simulación de operaciones de mantenimiento.
- Movilidad y transporte (interior y hacia el exterior) de robots y manipuladores móviles, humanoides y otras alternativas en locomoción.
- Componentes de robots resistentes a la radiación.

### 9.5.1. Teleoperación de tareas para *TechnoFusión*

El Área ATMR deberá permitir la realización eficiente de tareas teleoperadas de manipulación propias de *TechnoFusión*, tales como pruebas sobre las compuertas para diagnósticos de ITER o pruebas de prototipos de módulos de IFMIF. Una instalación de manipulación remota consta de dos componentes centrales que son el puesto de control del operador y el puesto remoto de manipulación. En la Figura 9.29 se representa esquemáticamente la interrelación entre ambos. El puesto de control del operador tiene una doble finalidad, por un lado se transmiten las órdenes generadas por el operador a los robots remotos, y por otro se le informa al operador del estado de la tarea en curso.

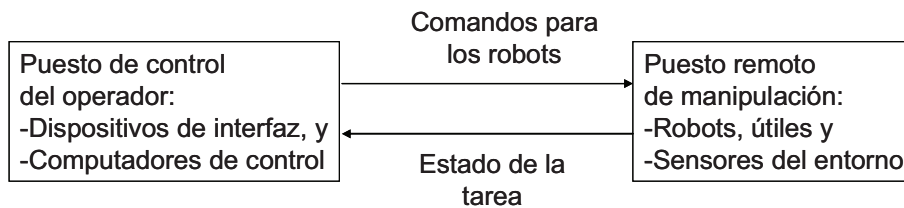
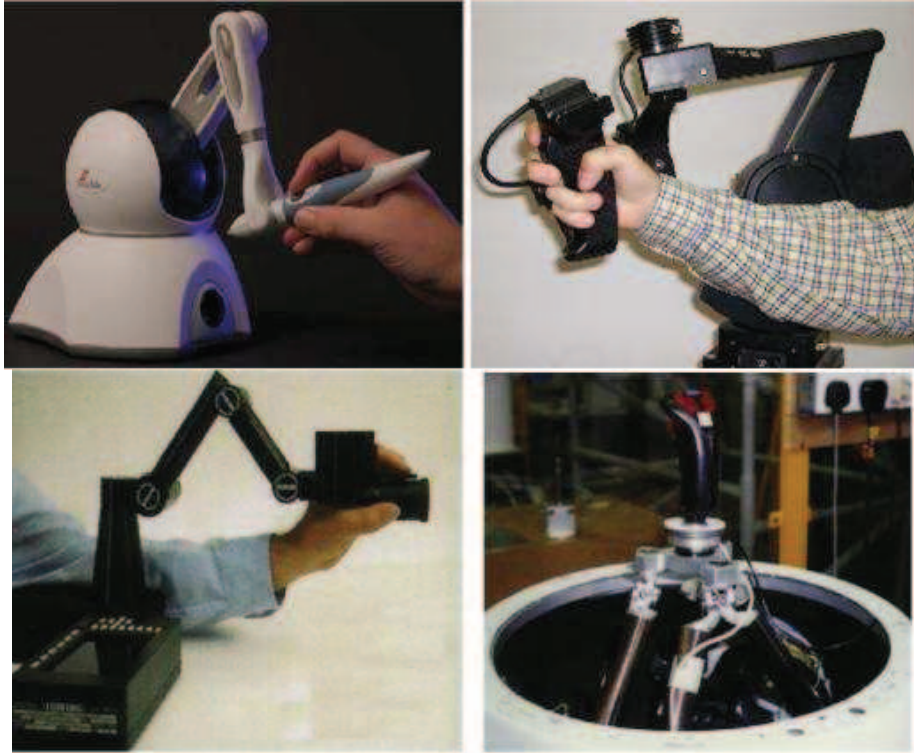


Figura 9.29. Esquema de funcionamiento del sistema teleoperador.

Para llevar a cabo esto se requiere la utilización de una avanzada interfaz de teleoperación cuyos principales equipos son:

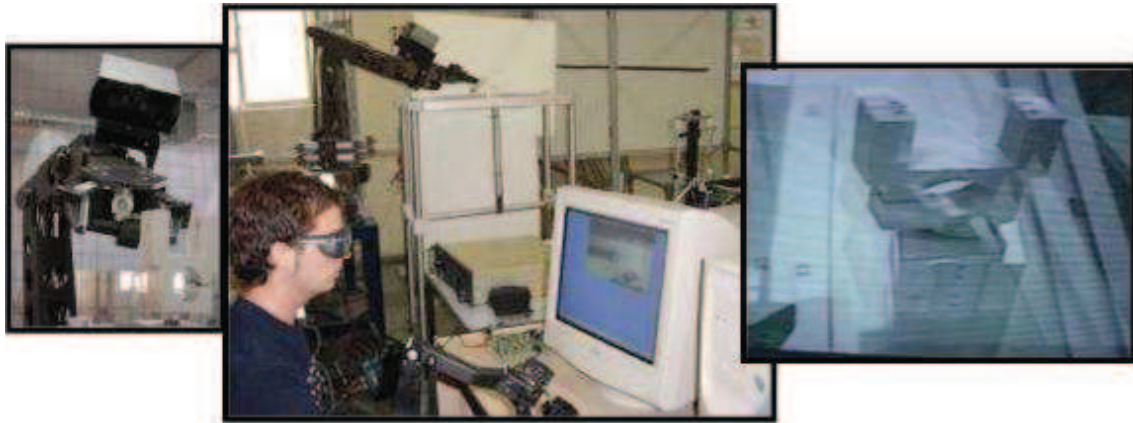
- Maestros con reflexión de fuerza: estos dispositivos siguen el movimiento de las manos del operador. Este movimiento se utiliza para generar la correspondiente trayectoria de movimiento al robot remoto (también llamado esclavo). Las fuerzas que se generan cuando el robot remoto interactúa con el entorno se reflejan sobre el maestro de forma que el operador ‘percibe’ las fuerzas que se generan durante la manipulación. Existen varios tipos de telemanipuladores en el mercado como los que se muestran en la Figura 9.30 que se corresponden con una arquitectura maestro-esclavo. Asimismo, también merecen especial mención las interfaces hápticas que cumplirían con la funcionalidad del maestro únicamente, y que serían conectadas a robot remoto. Un claro requisito de las tareas propias del Área ATMR de *TechnoFusión* es la necesidad de realizar tareas bimanuales con lo que se precisaría de la utilización de

dos maestros con reflexión de fuerza. Existen trabajos que demuestran que no suelen utilizarse ambos maestros a la vez durante la manipulación ya que un maestro suele utilizarse como apoyo del otro, pero que se obtiene una clara ventaja en la simplificación de procedimientos al utilizar las dos interfaces.



**Figura 9.30.** Distintos dispositivos hápticos utilizados habitualmente como maestros para el control de robots remotos en tareas de telemanipulación.

- Visualización de imágenes estereoscópicas y panorámicas: la visualización del entorno remoto de manipulación debe realizarse mediante el uso de dos monitores únicamente. Uno debe mostrar imágenes panorámicas y generales del entorno de trabajo y el otro debe utilizarse para visualizar imágenes estereoscópicas de los objetos que son manipulados. La visualización de imágenes panorámicas permite al operador conocer la posición relativa de los objetos dentro del entorno remoto lo que aumenta significativamente su percepción. Las imágenes estereoscópicas permiten al operador conocer con precisión los tamaños y distancias de los objetos que manipulan, lo que le permite realizar tareas con gran destreza. Es usual la utilización de numerosos monitores en los laboratorios de manipulación remota pero es de poca utilidad ya que el operador tiene dificultad para atender a varios monitores simultáneamente. En la Figura 9.31 pueden verse dispositivos de visión estereoscópica. En el futuro estos sistemas de visualización podrán sustituirse por entornos de realidad virtual.



**Figura 9.31.** Sistema de visualización de imágenes estereoscópicas. Robot con cámara binocular (izquierda), operador con gafas para la visualización correcta de imágenes estéreo (centro), imagen mostrada sobre la pantalla (derecha).

La interfaz de teleoperación ha de contar además con otros dispositivos que permitan la realización eficiente de las tareas, estos equipos serán específicos de la tarea a realizar como podrían ser: pulsadores, palancas, etc. Otro dispositivo que es de gran utilidad en algunos casos es un sistema de reconocimiento de voz que permita al operador generar órdenes de forma hablada o grabar comentarios de análisis técnico de situaciones y trabajos de operaciones, para su registro.

### 9.5.2. Robots de grandes prestaciones

En la manipulación de objetos de grandes dimensiones o pesos las estructuras convencionales, formadas por elementos articulados dispuestos en serie, son ineficaces ya que requieren unos accionadores con elevadas características de par que son difícilmente insertables en las mismas. Como alternativas a éstas pueden utilizarse estructuras de tipo paralelo, que permiten actuar de manera sincronizada sobre varios puntos del objeto a manipular actuando sobre varios puntos de manera sincronizada, o estructuras de tipo modular, formadas por elementos más sencillos que conectados de manera adecuada puedan dar lugar a estructuras más complejas.

Los robots paralelos (Figura 9.32) son aquellos cuya estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cerrada en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes.

A la vista de estas estructuras se pueden intuir los problemas que en su desarrollo hay que resolver en su desarrollo como estudio de su cinemática, de su dinámica y control de los mismos. Todo esto con la perspectiva de que en ellos van a existir unos requerimientos de precisión de posicionamiento y de control de esfuerzo necesarios en cualquier aplicación de mantenimiento.

Las estructuras modulares (Figura 9.33) han demostrado una gran flexibilidad para la realización de tareas robotizadas en el tipo de entornos como los de *TechnoFusión*. Los sistemas modulares tienen la ventaja de poder adaptarse a la tarea adoptando diferente tipo de configuraciones.

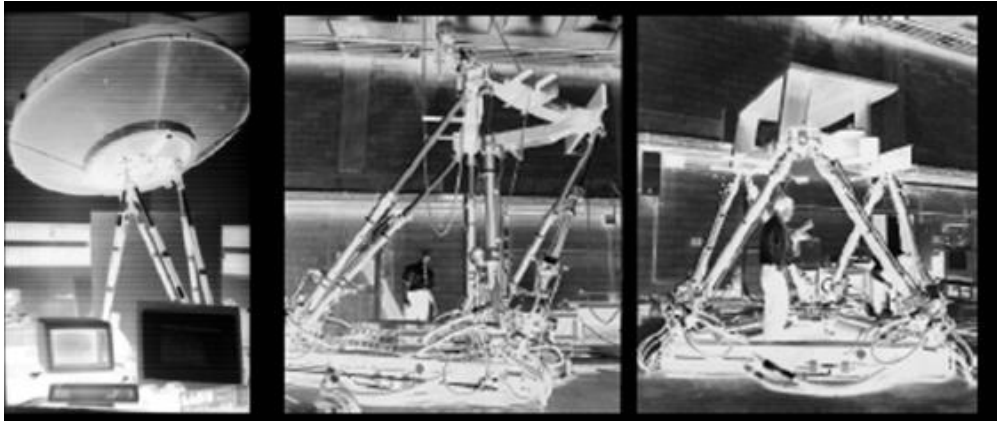


Figura 9.32. Ejemplo de robots paralelos.

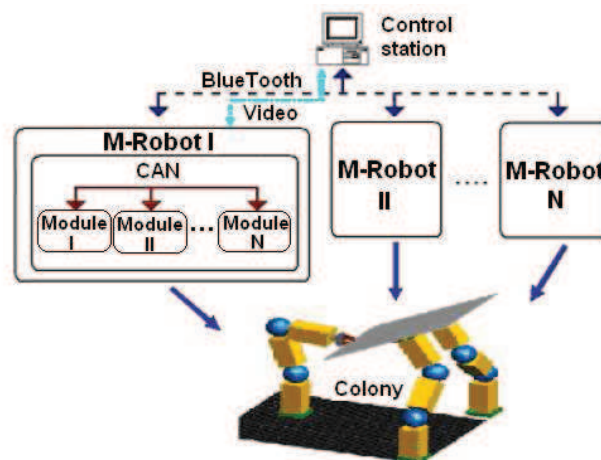


Figura 9.33. Sistema modular cooperando en la realización de tareas.

### 9.5.3. Percepción de entornos semiestructurados

La reconstrucción de entornos es un punto clave en la semiautomatización de tareas teleoperadas. Habitualmente se basan en la utilización de sistemas de visión por computador que permiten la reconstrucción del entorno de trabajo a partir de las imágenes captadas por las cámaras. Estos sistemas son de gran interés ya que permiten la semiautomatización de tareas, puesto que si se conoce la posición de

determinados objetos es posible procesar órdenes de alto nivel relativas a la tarea a realizar. La telemetría láser 3D puede considerarse también como una herramienta de gran utilidad en la reconstrucción de entornos. La información directa de distancias a los objetos que proporciona un telémetro láser permite igualmente la semiautomatización de tareas contando además con una gran precisión. Este sistema se integrará con la realidad virtual.

En la Figura 9.34 se muestra un sistema de reconstrucción de entornos para teleoperación, lo que permite entre otros el seguimiento de procedimientos de trabajo. La realización eficiente de tareas teleoperadas requiere la definición previa del procedimiento a realizar y permitir un control compartido entre el operador y los computadores del sistema. Es decir, que se consiga alcanzar un funcionamiento semiautomático, de forma que los computadores faciliten la realización de la tarea y el operador intervenga cuando la complejidad de las operaciones lo requiera.

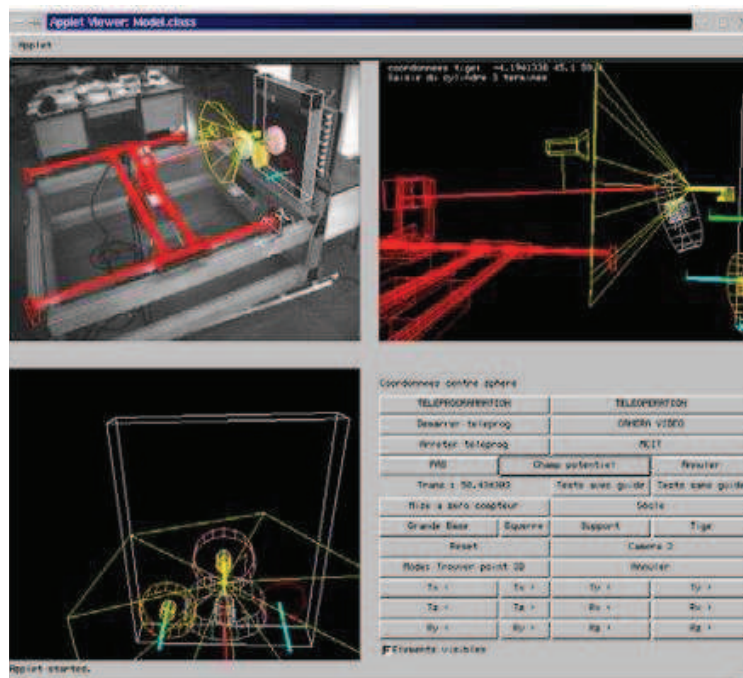


Figura 9.34. Sistema de reconstrucción de entornos para telemanipulación.

#### 9.5.4. Realidad virtual

Una de las tecnologías más prometedoras a incorporar a la manipulación remota es la realidad virtual para la creación de entornos artificiales mediante técnicas de representación visual realista de objetos y de sus propiedades. Esta técnica, que empieza a extenderse en juegos pero también en entornos industriales para equipos similares a entrenadores se considera que debe explorarse dentro del Área ATMR de

*TechnoFusión* para el ensayo simulado de diseño de manipuladores y de verificación de las soluciones que se vayan desarrollando para las operaciones, especialmente en situaciones que requieren la manipulación remota.

La realidad virtual está empezando a introducirse en múltiples campos, desde la promoción turística al urbanismo y proyectos de infraestructura, pasando por un aspecto en el que el Área ATMR debe tener un papel fundamental, como es el de entrenamiento de operadores de equipos complejos.

Puesto que las zonas de trabajo de los manipuladores son inaccesibles, además de la percepción motora del comportamiento de los robots por parte de los operarios como si los estuvieran gobernando directamente, la representación visual es fundamental. Para este tipo de representación se está avanzando en sistemas de representación gráfica realista vinculada a las acciones del operario. Se trata de emplear realidad virtual de tipo inmersivo. Por ello, esta área debe integrarse perfectamente con las expuestas en los apartados 9.5.1 “Teleoperación de Tareas para *TechnoFusión*” y 9.5.3 “Percepción de entornos semiestructurados” y aprovechar la información sensorial que estas áreas tecnológicas proporcionan.

### 9.5.5. Movilidad y transporte (en el interior y hacia el exterior)

En las distintas operaciones a realizar en el contexto del mantenimiento de equipos en las instalaciones de fusión es necesario realizar el transporte de componentes de los diferentes sistemas o de los mismos robots que van a realizar labores de manipulación.

Uno de los sistemas de transporte indispensables en este tipo de instalaciones son los puentes grúa (Figuras 9.35, 9.36 y 9.37). La definición del tipo concreto de puente grúa que ha de instalarse en el Área ATML de *TechnoFusión* deberá estudiarse en detalle en función de las necesidades específicas de transporte de las tareas a desarrollar. No obstante, la información que se puede extraer de los sistemas propuestos hasta el momento para este tipo de instalaciones<sup>154, 155</sup>, lleva a pensar en la posibilidad de utilizar grúas con varios cables independientes.

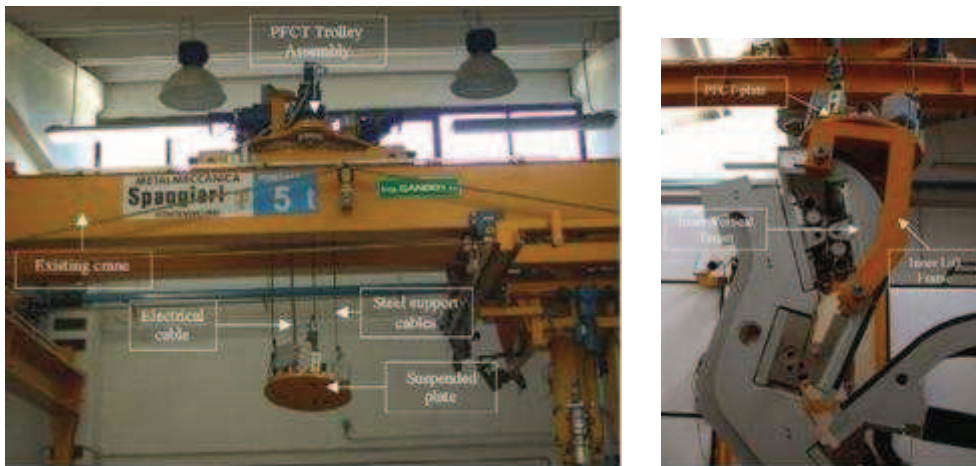
En estos casos las grúas deberán incorporar sistemas antibalaceo y técnicas de posicionamiento preciso. Se han desarrollado sistemas y técnicas de este tipo para grúas con grandes cargas<sup>152-153</sup>. Sin embargo, no parece existir ningún sistema comercial con estas características por lo que será necesario construirlo específicamente para *TechnoFusión*. En relación a esta necesidad es importante tener en cuenta la experiencia del grupo *Robotis Lab* de la Universidad Carlos III de Madrid en sistemas antibalaceo para control de grúas.

---

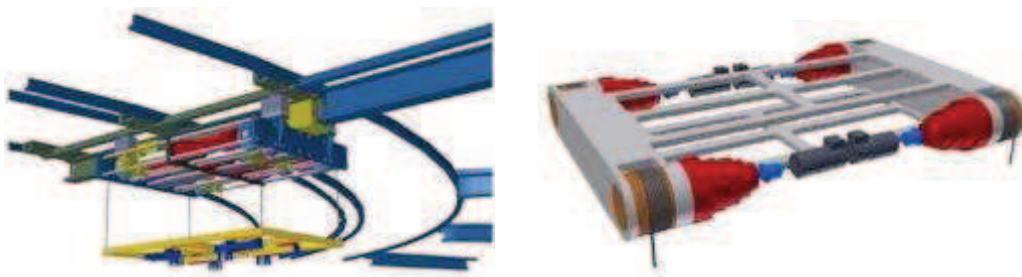
<sup>152</sup> “A Feedback Control System for Suppressing Crane Oscillations with On-Off Motors”. Keith A. Hekman and William E. Singhose. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 223-233, June 2007.

<sup>153</sup> “A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes”; Khalid L. Sorensen, William Singhose, Stephen Dickerson; *Control Engineering Practice* 15 (2007) 825–837.





**Figura 9.35.** (Izquierda) vista general del transportador de componentes de la primera pared, PFCT. Los principales elementos de los PFCT son el *Trolley Assembly*, los cables y el disco suspendido. (Derecha) Parte de la esquina vertical del PFC<sup>154</sup>.



**Figura 9.36.** Diseño conceptual de dos grúas propuestos por IBERTEF para ITER NBI RH <sup>155</sup>.

<sup>154</sup> ‘The plasma-facing components transporter (PFCT): A prototype system for PFC replacement on the new ITER 2001 casete mock-up’; G. Micciché et al., ENEA; Fusion Engineering and Design; January 2007.

<sup>155</sup> “ITER neutral beam remote maintenance system design, crane design report” ; EFDA Task: TW6-TVR-NBRH ; Gonzalo Taubmann (SENER). With permission to reproduce the two figures in this document.



Figura 9.37. Grúa robotizada en la Universidad Carlos III de Madrid <sup>156</sup>.

### 9.5.6. Componentes de robots resistentes a la radiación

Una de las áreas tecnológicas que habrá de estudiarse será la resistencia de los sistemas robotizados a la radiación. Puede tratarse de los sistemas desarrollados en *TechnoFusión* o cualquier otro robot manipulador. Tradicionalmente se han realizado estudios de la resistencia de los componentes más importantes como accionadores y sensores que han conducido al desarrollo de componentes específicos con garantías de funcionamiento bajo irradiación durante un determinado tiempo. En *TechnoFusión* se trataría de investigar el efecto de las radiaciones sobre equipos manipuladores completos, es decir robots, herramientas, grúas, etc., sometidos a radiación en su totalidad e incluso con el equipo manipulador realizando ciertas operaciones repetitivas.

Las instalaciones para la validación, ensayo y certificado de robots como por ejemplo el ROVVER 4 (Figura 9.38) utilizados en la generación de energía nuclear de la estación de Palo Verde, son escasas o inexistentes especialmente cuando el robot alcanza determinadas dimensiones. En este ámbito el Área ATMR de *TechnoFusión* podría trabajar y crecer en la creación de robots de gran tamaño, al poseer instalaciones de gran envergadura.

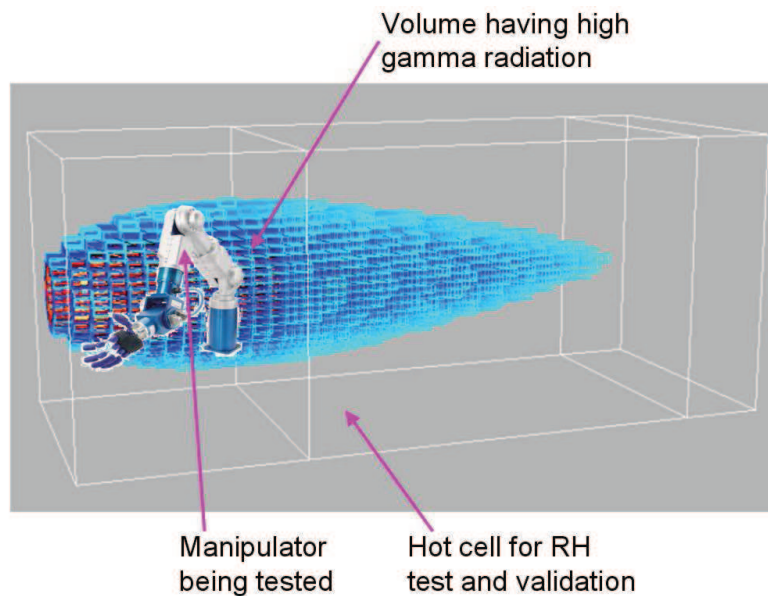
Las Figuras 9.39 y 9.40 muestran el diseño preliminar y los resultados para la instalación planificada con el fin de probar manipuladores, en base a los cálculos para la optimización del diseño de la Nave NEBI y la distribución de la radiación con

<sup>156</sup> S.Garrido; M.Abderrahim; A.Giménez; R.Díez; C.Balaguer. Anti-swinging Input Shaping Control of an Automatic Construction Crane . IEEE Transactions on Automation Science & Engineering. Vol. 5. No. 3. pp.549-557. 2008.

gammas sobre los equipos llevados a cabo por Y. Herreras<sup>157</sup>, colaborador de este proyecto.

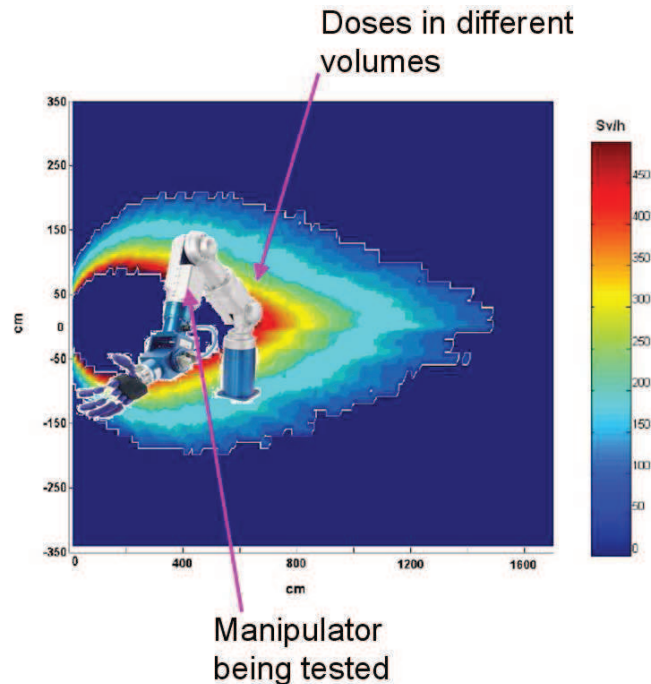


**Figura 9.38.** Cámara y robot ROVVER 4 para la inspección y mantenimiento en PVNGS (Estación de generación nuclear Palo Verde Nuclear, una planta de fisión nuclear)



**Figura 9.39.** Diseño preliminar para permitir el ensayo y certificación de manipuladores dentro de la Nave de Experimentación Bajo Irradiación del Área ATMR de *TechnoFusión*.

<sup>157</sup> Informe interno “Cálculo para la optimización del diseño del Laboratorio de Manipulación Remota”. Y. Herreras. Instituto de Fusión Nuclear.”



**Figura 9.40.** Cálculos preliminares de la dosis para la certificación de manipuladores y herramientas de manipulación remota.

## 9.6. Requerimientos de espacios físicos, instalaciones y seguridad

### (I) Espacios físicos e instalaciones requeridas

Para el desarrollo de las actividades de investigación y desarrollo tecnológico, el Área ATMR de *TechnoFusión* requiere el uso de los siguientes espacios:

- *Nave de Experimentación con Grandes Prototipos*: esta nave será el entorno donde se podrán montar maquetas de parte de las instalaciones del reactor de fusión y los robots de manipulación para probar la realización de las operaciones que es preciso desarrollar o ensayar. Deberá albergar, aunque no necesariamente de forma simultánea, diferentes experimentos de validación para IFMIF, ITER y DEMO. Para ello se ha estimado un tamaño mínimo (ver Tabla 9.3) de (30 x 13 x 15) m para albergar tales experimentos.
- *Nave de Experimentación Bajo Irradiación*: en esta nave se validará el funcionamiento de robots manipuladores completos o partes de robots relativamente complejas bajo los niveles de irradiación requeridos para la correspondiente aplicación. Los manipuladores se introducirán en la

nave y se irradiarán durante el tiempo necesario, pudiendo realizarse tareas de manipulación repetitivas durante la irradiación para mayor similitud con las futuras operaciones reales del manipulador. Las dimensiones mínimas aproximadas (ver Tabla 9.3) previstas serán de (4 x 4 x 3) m, si bien puede ser recomendable un habitáculo de 5 x 5 m<sup>2</sup> con una altura de 4 m para tener una mayor flexibilidad a la hora de certificar manipuladores de gran tamaño que puedan ser requeridos en grandes dispositivos de fusión como DEMO. Esta estimación puede llegar a variarse en el diseño definitivo detallado por los estudios de ingeniería y arquitectura.

- Laboratorio de investigación: 400 m<sup>2</sup>.
- Departamento de diseño de sistemas robotizados: 100 m<sup>2</sup>
- Almacén general: 500 m<sup>2</sup>

Las dos instalaciones específicas experimentales deben permitir no sólo la operación de los sistemas robóticos para realizar las tareas que hay que ensayar sino también su desarrollo y montaje. Teniendo en cuenta la proximidad de los edificios convendría disponer de un medio de transporte basado en raíles o túneles que faciliten el transporte de equipos irradiados y compartir instalaciones tales como almacenes o salas de descontaminación.

Además debe contar con una zona en la que instalar la sala de telemando remoto de los robots que simule partes de la sala real de telemanipulación de una central de fusión o de cualquier otra instalación para fusión. Además, aunque el espacio ocupado será reducido, será necesario un panel de control móvil de manipulación *in situ*, es decir situado donde sea necesario dentro de la nave experimental, para facilitar la realización de las operaciones de ensayo y mejora del sistema experimental en sí mismo.

En la Tabla 9.3 se presentan de forma sintética los requisitos iniciales de espacios para cada una de las partes en la Nave de Experimentación con Grandes Prototipos y la Nave de Experimentación Bajo Irradiación.

**Tabla 9.3.** Requisitos de espacios para las Naves de Experimentación del Área ATMR de *TechnoFusión*.

Operaciones de MR	Espacio para Simulación L x A x H (m)	Espacio en Almacén L x A x H (m)	Observaciones
Extracción e inserción de DPP y TBM	30 x 6.5 x 7	10 x 6.5 x 7 3 unidades	Se supondrá que existe una maqueta con partes intercambiables
Desplazamiento de los Casks	20 x 13 x 4.5	8.7 x 2.6 x 3.7 2 unidades	Se puede trabajar con un Cask y tener el otro almacenado
MR en la Sala de Experimentación Bajo Irradiación	4 x 4 x 3*	25 m <sup>2</sup>	Son equipos pequeños por lo que en el almacén puede tener formas variadas
Extracción e inserción de los Módulos de Irradiación	4.4 x 3.7 x 15	4.4 x 3.7 x 2	Determina la altura del edificio. No se puede desplazar

A continuación se describen en mayor detalle las dos naves principales que constituirán el Área ATMR de *TechnoFusión*:

(a) Nave de Experimentación con Grandes Prototipos

La envolvente que se define “espacio para simulación” es de 30 m de largo x 13 m de ancho x 15 m de alto. Por tanto, esta Nave deberá tener al menos esas dimensiones, en caso de que se dispusiera de un almacén adicional. Algunos de los criterios a tener en cuenta:

- Las paredes de la Nave deberán soportar las cargas de la ‘Grúa Principal’ y sería muy conveniente que también se planificaran raíles y paredes adecuadas para una ‘Grúa Secundaria’ que cubriría parte (o la totalidad) de la nave experimental y situada en un nivel inferior respecto de la ‘Grúa Principal’. La ‘Grúa Secundaria’ emularía la grúa de la *Hot Cell* de ITER para movimiento y acceso sobre los *Port Plugs*<sup>147</sup>.
- Una zona de las paredes de la Nave deberá soportar las cargas de una futura grúa pluma para manipulación de cargas en la *Hot Cell* de ITER<sup>147</sup>.
- El acceso a la ‘Grúa Principal’ desde la parte superior de la Nave debe ser posible y el tiempo de acceso, aún pudiendo ser elevado, debe ser aceptable para realizar un cambio de carro de dicho puente grúa cada 3-10 años. Tales cambios serán necesarios para adaptar el carro a los futuros requerimientos. Esto ya ha ocurrido en cierto grado por ejemplo en la instalación de ensayo para fusión de ENEA-Brasimone.
- El almacén debe ser fácilmente accesible por el puente grúa situado en la nave experimental o, en su defecto, el movimiento de piezas de gran tamaño (varios metros de largo) y/o decenas de toneladas de peso debe realizarse con comodidad, seguridad y rapidez. En un principio lo más adecuado sería situar el almacén a continuación de la nave experimental en su sentido longitudinal de forma que el puente grúa tenga acceso tanto al área experimental como al almacén. Para las pequeñas piezas no es necesaria tal distribución en planta y cualquier recinto sería adecuado.

(b) Nave de Experimentación Bajo Irradiación

Para esta nave se debe contar con un habitáculo aislado e independiente, el volumen concreto necesario es más difícil de estimar pues requiere el conocimiento del tamaño de los robots manipuladores y las grúas a validar bajo radiación, junto con el número de robots a irradiar simultáneamente. A mayor número de robots a irradiar en una sola vez mayores beneficios y mayor inversión en el acelerador e instalaciones existirá. Se debe lograr un equilibrio en la inversión en base a:

- El coste de una nave como ésta para validar grúas del tamaño real utilizado, por ejemplo en ITER, sería excesivo. Sólo ciertas partes de las grúas se considerarán para su validación y en su caso certificación. Por ejemplo, el carro de la grúa dotado de todos sus componentes y unos carriles mínimos.

- Los robots y estructuras de manipulación de mayor tamaño pueden ser relativamente grandes, pero los de mayor tamaño podrían en casos excepcionales dividirse en dos o tres partes (la división en más partes no es posible para no perder la esencia de los ensayos, es decir, el ensayo de manipuladores de manipulación remota completos). El robot manipulador mayor en IFMIF puede introducirse en una envolvente de (2 x 2 x 1) m. Ciertos manipuladores tales como el *Mover* para la extracción de los *Port Plugs* de ITER caben en una envolvente de 3 x 3 x 3 m. El robot manipulador principal para el mantenimiento de los *Upper Port Plugs* de ITER puede introducirse en un volumen de aproximadamente (1.5 x 1.5 x 1.5) m.
- El mercado potencial de certificaciones de robots para entornos activados existente a nivel mundial, que es de más de 100 robots diferentes de gran tamaño y centenares de herramientas para los próximos 10 años y de cientos de robots a partir del comienzo de la construcción de DEMO.
- El valor de radiación *gamma* en los lugares de trabajo en ITER, IFMIF, etc. donde trabajan más robots y en los lugares de máxima radiación. Los valores de dosis de radiación recibida por los robots son muy diversos, desde 500 Gy/h dentro de la cámara de vacío 12 días después de la parada de la instalación hasta 1 Gy/h o menos fuera de la cámara de vacío. Por tanto, esta Nave debe encontrar un punto de equilibrio para poder irradiar el máximo número de robots para el máximo número de clientes potenciales.
- El valor de radiación *gamma* óptima en la zona de mayor irradiación en el interior de la Nave y el valor en la segunda fila de robots. El valor mínimo de dosis requerida en la primera fila de robots (ver Figura 9.40) es de 500 Gy/h, mientras que en la segunda fila será de 100 Sv/h. Una pequeña zona de 1 m<sup>3</sup> sometida a radiación de unos 2000 Gy/s sería también muy deseable.
- El número de robots de tamaño promediado que caben en la Nave. El tamaño mínimo absoluto de esta nave será de (4 x 4 x 3) m, siendo necesaria una dimensión de (5 x 5 x 4) m para que la nave pueda comenzar a ser relevante en el mercado de la irradiación de robots completos para fusión.

En el apartado 9.4.2 se ha mostrado más detalladamente los criterios seguidos para estimar el volumen necesario de la Sala NEBI del Área ATMR de *TechnoFusión*, especificando el volumen mínimo para cubrir la demanda que pueda existir en dispositivos de fusión e industria, desde el punto de vista de validación y certificación de los robots y manipuladores bajo irradiación representativa de cada medio donde operará. Para ello se ha realizado un estudio de tamaño medio de los robots que pueden llegar a usarse en ITER, DEMO e IFMIF y la radiación *gamma* necesaria para poder certificarlos en condiciones de irradiación equivalente.

## (II) Requerimientos de seguridad

A continuación se desarrollará algunos de los riesgos específicos a tener en cuenta en el Área ATMR, si bien, estos riesgos específicos y los generales, junto con las medidas de seguridad necesarias asociadas a esta instalación y a *TechnoFusión* deberán desarrollarse más exhaustivamente por los estudios externos de ingenierías.

Como medidas de seguridad específicas, el Área ATMR de *TechnoFusión* debe cumplir la normativa relativa a seguridad de robots inherente a las instalaciones industriales. Dicha normativa se basa en la norma ISO 12100, elaborada por el Comité Técnico ISO/TC 184 (Sistemas de automatización industrial e integración) y el Subcomité SC2 (Robots para entornos industriales) y se deberá aplicar tanto en la Nave de Experimentación con Grandes Prototipos como en la Nave de Experimentación Bajo Irradiación. Los principales puntos a tener en cuenta de esta normativa son los relativos a los espacios de seguridad que se deben considerar en la instalación y los sistemas de parada del robot. El espacio de seguridad está comprendido por toda el área de trabajo cubierta por los robots y demás equipos que intervienen en la manipulación. Esta zona debe estar claramente delimitada y su acceso prohibido durante la realización de tareas con los robots. Las paradas pueden producirse como respuesta a una emergencia que normalmente se activa por el correspondiente accionamiento del operador, o como medida de protección debida a un acceso no previsto en el área de seguridad del robot. La norma ISO 10218-1 hace una descripción más detallada de los requisitos y recomendaciones que se deben contemplar en el diseño de las instalaciones.

Las instalaciones deberán estar dotadas de señalizaciones de seguridad y salud en los lugares de trabajo tal y como se contempla en el BOE nº 97 23/1997 (R.D. 485/1997).

Las medidas de seguridad que se deberán tener en cuenta en la Nave de Experimentación Bajo Irradiación, al estar sometido a los efectos de radiaciones ionizantes, estarán sujetas a los protocolos y reglamento de protección sanitaria contra Radiaciones Ionizante (R.D. 783/2001). La radiación *gamma* presente en la instalación, con una tasa de dosis del orden de 100 a 700 Sv/h, obliga a dotar a la Nave de Experimentación Bajo Irradiación de los blindajes contemplados en el reglamento mencionado anteriormente. Cabe destacar el blindaje necesario para la puerta de acceso desde el exterior, siendo forzoso dotar a dicha puerta de fácil acceso y de grandes dimensiones para permitir introducir los manipuladores a caracterizar bajo irradiación. En el caso de existir trabajadores profesionalmente expuestos durante la operación, estos se registrarán por el protocolo de Vigilancia Sanitaria Especifica de trabajadores expuestos (categoría A y B) a riesgos de radiaciones ionizantes, realizándose exámenes de salud periódicos por el personal del Servicio de Prevención Radiológica (propio o ajeno).

Se deberá tener en cuenta si las radiaciones *gamma* pudieran producir activación de alguno de los componentes irradiados y en su caso proceder a la descontaminación y almacenamiento de los materiales y equipos mínimamente activados en la Nave de Experimentación Bajo Irradiación.