



Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión

Informe Científico – Técnico

Julio 2009

Autores y Contribuciones

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

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

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

Resumen Ejecutivo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Área de experimentación de Irradiación de Materiales

5.1. Introducción

Como ya se ha comentado anteriormente, los materiales que se emplearán en el interior de los futuros reactores de fusión estarán expuestos a un entorno especialmente agresivo como consecuencia del campo de radiación que se creará durante las reacciones nucleares. El plasma caliente generará un flujo muy importante de neutrones de alta energía, radiación *gamma* y partículas energéticas que afectarán especialmente a los materiales situados en la primera pared del reactor y en el manto reproductor, aunque también a los sistemas más alejados de ella como los de calentamiento del plasma o los de diagnóstico. La radiación ionizante, a través de fenómenos de desplazamiento atómico y procesos de ionización, puede producir diferentes defectos en la estructura de los materiales, afectando en mayor o menor medida a sus propiedades físicas a gran escala. Sumado a esto, las reacciones nucleares con los neutrones generarán productos de transmutación que impurificarán el material modificando su comportamiento físico y, con ello, los requisitos necesarios exigidos como materiales funcionales. Las altas temperaturas y los intensos campos magnéticos presentes durante la operación del reactor ejercerán también una especial influencia en dichas propiedades.

Estudiar el efecto que produce la radiación neutrónica sobre los materiales de un futuro reactor de fusión es una de las principales líneas de investigación que se llevarán a cabo durante las próximas décadas. El efecto de los neutrones sobre los materiales se traduce fundamentalmente en dos fenómenos físicos: i) el desplazamiento de iones de sus posiciones de la red cristalina, dando lugar a defectos puntuales y ii) la generación de reacciones nucleares de transmutación que dan lugar a la aparición de impurezas en el interior de los materiales, siendo las más importantes el He y el H. Como se verá más adelante, el cociente entre el nivel de He e H y la cantidad de defectos puntuales producidos es uno de los parámetros principales a la hora de entender el efecto de la radiación en los materiales. Las fuentes de neutrones como la de IFMIF cuya función son los estudios antes mencionados presentan importantes dificultades tecnológicas, al mismo tiempo que tienen una baja versatilidad. Debido a ello, en la actualidad se investiga una manera más sencilla de simular el efecto de la radiación neutrónica y que a su vez conlleve menos riesgos radiológicos. Con los estudios de simulación computacional realizados se ha llegado a la conclusión de que el efecto de los neutrones puede simularse de manera muy próxima a la realidad mediante el empleo de un conjunto de aceleradores de iones que permitan implantar de forma simultánea He, H y un ión pesado capaz de producir defectos puntuales (por ejemplo Fe en el caso de la irradiación de aceros).

Para el estudio del efecto de la radiación ionizante sobre las características de los materiales, se requiere una fuente que permita irradiar con un campo de radiación *gamma* razonablemente uniforme. Además, para obtener resultados válidos, la tasa de dosis debe ser equivalente a la esperada en ITER (niveles de radiación 100 – 500 Gy/h²³). La fuente de radiación ionizante *gamma* más adecuada para simular este efecto es un acelerador de electrones con una línea de vacío suficientemente flexible como para poder descomponerse en varias líneas de menor intensidad. Al incidir estas

²³ Comunicación privada de J. Palmer (Remote Handling Field Coordinator en EFDA-CSU Garching)

líneas de electrones sobre una lámina de un material adecuado (generalmente un metal pesado) se crea un campo de radiación *gamma* en la zona adyacente. La utilización de un acelerador de electrones frente a las fuentes de radiación *gamma* convencionales (fuente ^{60}Co) presenta como ventajas la desaparición del peligro radiológico asociado al proceso al cesar el funcionamiento del mismo y la posible regulación del flujo de radiación *gamma* mediante la variación de la corriente y la energía del haz. Como inconveniente, el espectro de radiación *gamma* emitido (principalmente *bremstrahlung*) es diferente del que se espera en ITER. No obstante, esta diferencia en energías no es significativa ya que en el caso de la interacción de la radiación ionizante con la materia lo importante es el nivel de excitación electrónica inducido, es decir, la tasa de dosis ionizante.

Por otra parte y como ya se ha indicado, además de los neutrones y de la radiación ionizante los materiales de un futuro reactor de fusión van a estar sometidos a intensos campos magnéticos (probablemente estacionarios o con pequeñas variaciones temporales). Hasta el momento la mayor parte de los estudios realizados para caracterizar el efecto de la radiación sobre las propiedades macroscópicas y microscópicas de los materiales no han tenido en cuenta esta circunstancia y apenas existen trabajos en los que se analice el efecto de la radiación en presencia de un campo magnético. La disponibilidad de un imán de alto campo magnético (entre 5 y 10 T) junto con el conjunto de aceleradores de iones anteriormente expuesto, permitiría la realización de experimentos en los que se podría analizar el posible efecto de la presencia simultánea de radiación y campos magnéticos en las distintas propiedades de las muestras.

En el marco expuesto anteriormente, *TechnoFusión* se plantea como uno de sus principales objetivos llevar a cabo ensayos de materiales bajo irradiación de tipo neutrónico e ionizante para evaluar la modificación/degradación de sus propiedades. En este sentido las Instalaciones de *TechnoFusión* contarán con un **Área de experimentación de Irradiación de Materiales (AIM)** que dispondrá de tres aceleradores de iones: uno para implantar iones pesados (Fe, Si, C, etc.) y dos para iones ligeros (H y He) con los que se estudiará el efecto de la radiación neutrónica en materiales similares a los que se emplearán en reactores como ITER y DEMO. Asimismo, esta Área incluirá un estudio sobre un acelerador de electrones que estará físicamente cercano a las instalaciones de las Áreas de Tecnologías de Manipulación Remota (para generar radiación ionizante *gamma*) y de Tecnología de Metales Líquidos (para estudios de superficie libre) de *TechnoFusión*, y de las que se hablará en los capítulos siguientes de este informe. Además, esta Área de investigación contará con un imán de alto campo magnético para evaluar el efecto simultáneo de la radiación y el campo magnético en aleaciones metálicas y con un neutralizador de carga de haz.

5.2. Objetivos

El propósito evidente del Área AIM de *TechnoFusión* es demostrar que el daño producido en los materiales por el impacto de iones ligeros y pesados de alta energía es equivalente (en términos de evolución de la microestructura y de impurificación) al producido por los neutrones generados dentro de un dispositivo de fusión nuclear. Es decir, se intentará demostrar que los aceleradores de iones de la instalación serán capaces de simular el efecto de la radiación neutrónica sin necesidad de emplear para

ello una fuente de neutrones. Una vez evaluados y escogidos los implantadores apropiados, el objetivo es demostrar, desde un punto de vista experimental, la capacidad de la instalación de producir daño en un cierto volumen de la muestra y que este daño se produzca de forma relativamente homogénea en el material. Para alcanzar estos objetivos se emplearán dos métodos diferentes:

- I. Irradiar el material con iones de su misma composición (por ejemplo irradiar Fe con iones de Fe), para producir desplazamientos junto con una doble implantación simultánea de iones ligeros (H, He): esta triple irradiación se llevará a cabo con el fin de conseguir la misma cantidad de desplazamientos en la red y la misma concentración de iones ligeros que las que se generarán en las instalaciones de fusión.
- II. Irradiar el material únicamente con protones de 40 y 70 MeV, con el fin de producir un daño similar al de los neutrones de fusión y generar al mismo tiempo H y He por transmutación. Tales valores de energía se han escogido en base a un conjunto de cálculos teóricos realizados previamente (ver Anexo I). Este método se propone porque permite irradiar fácilmente espesores de muestras del orden del milímetro (muy superiores a los que pueden tratarse por el método I), al mismo tiempo que genera directamente el H y He suficiente sin tener que implantarlo.

Como demostración de los puntos anteriores, en el Anexo I de este informe se exponen los cálculos realizados para el análisis de las intensidades necesarias de los iones o de los protones para producir el daño deseado en los materiales, por ambas vías de actuación. Es decir, las intensidades suficientes para que el daño en los materiales sea equivalente al daño de las futuras instalaciones de fusión. Para ello se ha tenido en cuenta diferentes factores como la energía mínima de los iones para obtener la penetración deseada en los materiales, la irradiación homogénea en todo el intervalo de penetración, obtener los cocientes de concentraciones de iones ligeros/dpa necesarios para alcanzar los niveles de fusión (Figura 5.1) y los espectros de PKA²⁴ (*Primary Knock-on atom*) deseados. A su vez también se ha estudiado la activación y la transmutación de los elementos de las muestras debido a la implantación de iones ligeros o por la irradiación de protones. Estas simulaciones han permitido al mismo tiempo avanzar en el diseño de los aceleradores de iones (ligeros y pesados). En la Figura 5.1 se muestra el cociente de la concentración de He producido, en unidades de átomos de He por millón de la muestra, (appm²⁵ He) vs daño generado en unidades de desplazamientos por átomo (dpa), es decir, el cociente “(appm He)/(dpa)” producido en un material de Fe en una semana de irradiación para varias instalaciones existentes. Estas incluyen reactores de fisión nuclear, aceleradores de partículas, así como las instalaciones futuras para el desarrollo de la fusión nuclear como IFMIF, ITER y DEMO. En dicha gráfica, al representar el área de influencia de *TechnoFusión* (recuadro amarillo), se puede ver que los valores esperados del cociente appm He/dpa de las instalaciones futuras de fusión nuclear están dentro del rango de operación de *TechnoFusión*.

²⁴ El PKA se define como los primeros átomos que se desplazan de un material como consecuencia de la colisión directa del ion incidente.

²⁵ appm: “*atomic part per million*”. Fracción de átomos de la red del blanco que se desplazan de su posición por efecto de la radiación aplicada sobre él.

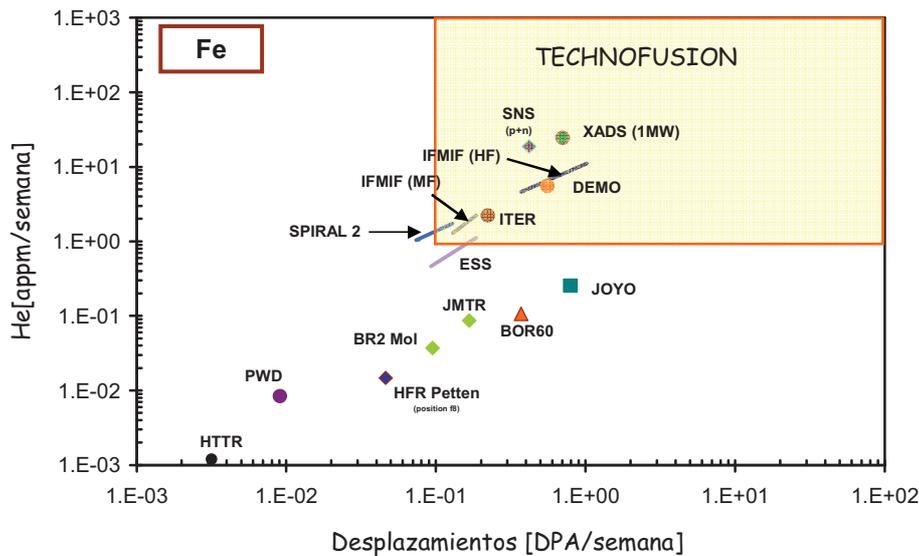


Figura 5.1. Comparativa del cociente appm He/dpa en Fe bajo irradiación en diferentes instalaciones (aceleradores de partículas, instalaciones de fisión, y futuras instalaciones de fusión). Se observa que el área de operación de *TechnoFusión*, cuando se realiza una irradiación doble de Fe (300 MeV) y He (10 MeV), engloba perfectamente las regiones de operación de las futuras instalaciones de fusión.

En la Figura 5.2 se muestran además algunos de los datos más importantes a tener en cuenta como son la función de daño ($W(T)$) generada por protones (Figura 5.2a), y por iones (Figura 5.2b), en material de hierro comparados con la prevista para la instalación IFMIF. La función de daño es el espectro de energías cinéticas de los PKA generados por los iones o los protones pesados por el daño que deposita cada PKA en función de la energía cinética que tiene inicialmente. En esta Figura se puede apreciar que las funciones de daño están dentro o muy cerca de los rangos analizados para IFMIF. Para el caso de los iones de Fe (Figura 5.2b) se puede ver que la función de daño está parcialmente fuera del rango de operación de IFMIF. Esto podría parecer un inconveniente, pero hay que tener en cuenta que no sólo se está muy cerca, sino que, además, se puede reproducir perfectamente los cocientes appmHe/dpa de fusión, ya que sólo depende de la intensidad de implantación del He, por lo que el daño evolucionará de forma muy parecida. Para el caso de los protones de 40 y 70 MeV se puede ver que la función de daño si está prácticamente en el rango de influencia de IFMIF por lo que consecuentemente es una buena aproximación. El inconveniente de esta alternativa (ver Anexo I) es que el cociente de appmHe/dpa es tres veces mayor que el esperado para DEMO, por ello, en la actualidad se realizan simulaciones para disminuir la energía de los protones a 20 MeV, ya que la función de daño no variará considerablemente aunque sí la producción de He.

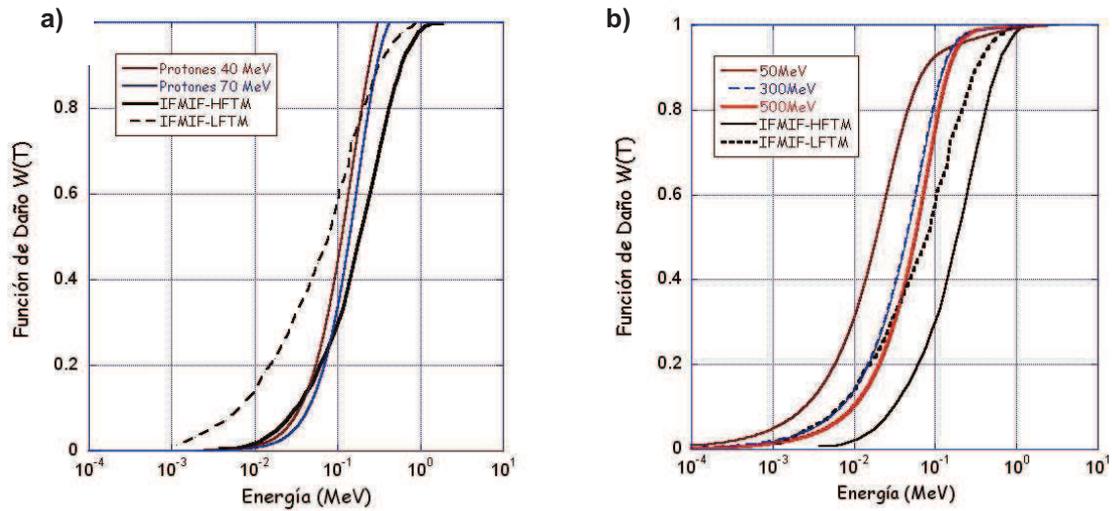


Figura 5.2. Funciones de daño generadas en material de Fe por a) protones de 40 y 70 MeV b) iones de Fe de 50, 300 y 500 MeV. Ambas funciones de daño se comparan con la función de daño esperada en el rango de operación de IFMIF

Estos métodos de modificación de los materiales permitirían llevar a cabo estudios relevantes que aborden los problemas de materiales actualmente identificados en el desarrollo de dispositivos de fusión como ITER, IFMIF y DEMO. Algunos de estos estudios son el efecto de la radiación en:

- Propiedades estructurales de materiales como aceros reforzados con óxidos, tungsteno, aleaciones de vanadio o carburo de silicio.
- Propiedades físicas (permeabilidad, corrosión, conductividad eléctrica,...) de estos materiales estructurales.
- Realización de experimentos controlados (con control del nivel de producción de defectos puntuales, concentración de impurezas como H y He, nivel de excitación electrónica, presencia de campo magnético, etc.) para su modelización.
- Uniones y técnicas de soldadura.
- Materiales aislantes para diagnósticos y sistemas de calentamiento.

Estos estudios permitirán a largo plazo un desarrollo y validación de reglas de diseño para materiales irradiados.

5.3. Situación internacional de las tecnologías propuestas

5.3.1. Instalaciones de referencia internacionales en irradiación iónica y electrónica

A nivel europeo la instalación JANNUS (*Joint Accelerators for Nanosciences and NUclear Simulation*) en Saclay-Francia, perteneciente al CSNSM (*Centre de Spectrométrie de Masse et de Spectrométrie Nucléaire*)²⁶ tiene unos planteamientos similares a los de *TechnoFusión*, por la capacidad de una implantación triple. JANNUS contará entre sus equipos con un implantador de iones pesados de 3 MeV y con dos implantadores de iones ligeros (un Van de Graaff de 2.5 MeV y un tandem de 2 MeV). En la Figura 5.3 se muestra un esquema de los diferentes aceleradores de JANNUS y de sus características principales. Asimismo, en la Tabla 5.1 se enumeran los iones que pueden acelerar cada uno de estos equipos y la energía máxima estimada para ellos.

Los aceleradores de JANNUS²⁷ presentan como principal inconveniente que la energía máxima de aceleración de sus iones es muy baja (del orden de 3 MeV), con una penetración de unos pocos cientos de nanómetros en el material. En cuanto a técnicas de caracterización, sólo cuenta con un Microscopio Electrónico de Transmisión de 200 keV como técnica de análisis *in situ* para el estudio de los materiales durante la irradiación.

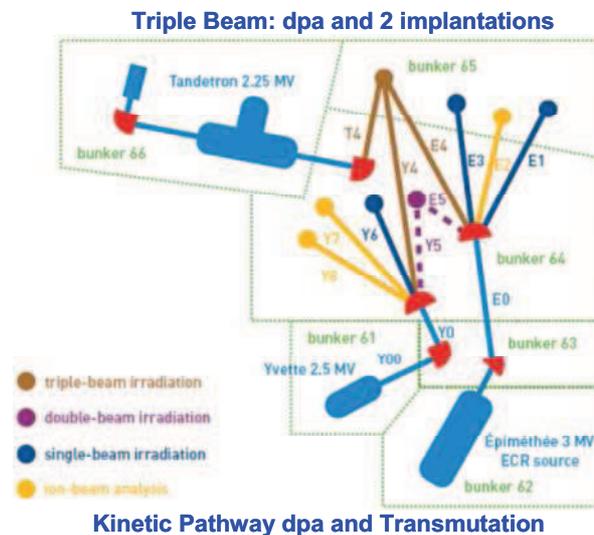


Figura 5.3. Diagrama de los diferentes puntos de irradiación de la futura instalación JANNUS. En el diagrama se especifican además las energías alcanzables por los diferentes tipos de aceleradores que serán instalados.

²⁶ www.csnsn.in2p3.fr/

²⁷ Y. Serruys, P. Trocellier, S. Miro, E. Bordas, A. Barbu, L. Boulanger, O. Leseigneur, S. Cabessut, M.-O. Ruault, O. Kaïtasov, S. Henry, Ph. Trouslard, S. Pellegrino, S. Vaubaillon, and D. Uriot, CFRM-13 13th International Conference on Fusion Reactor Materials 2007, December 10 – 14, Nice (France)

Tabla 5.1. Iones acelerados y valores de energía y para cada unos de los tres aceleradores de la instalación JANNUS.

Acelerador	Ión	Máxima energía
Epiméthée (Pelletron)	H, D, ³ He, C, N, O, Fe, Ni N ₂	3 MeV
Yvette (Van de Graaff)	H, D, ³ He, ⁴ He	2.5 MeV
Japet (tandem)	H, iones halógenos, P, S, iones metálicos	2 MeV

A nivel mundial tan sólo existe una instalación similar a la propuesta para *TechnoFusión*. Se trata de la instalación TIARA²⁸ (*Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application*) localizada en Japón. Este Centro (Figura 5.4) cuenta con cuatro aceleradores de iones: un acelerador de iones pesados de tipo ciclotrón AVF (*Azimuthally Varying Field*) de $k=110$ ²⁹, un acelerador tipo tandem de 3 MV, un acelerador tipo *single-ended* de 3 MV y un implantador de iones de 400 kV. El complejo de aceleradores de TIARA ofrece una gran variedad de especies de iones, desde ligeros como H hasta pesados como Au, y un amplio rango de energía desde los keV a los MeV (ver Figura 5.5). Al igual que JANNUS, los aceleradores de esta instalación presentan ciertos inconvenientes, en este caso no existe la posibilidad de irradiar con el haz del ciclotrón y los aceleradores lineales simultáneamente.

Además de JANNUS y TIARA, existen en el mundo otras instalaciones y grupos de investigación dedicados a las tecnologías de irradiación. En la Tabla 5.2 se muestra un listado de dichos grupos y de los implantadores que poseen.

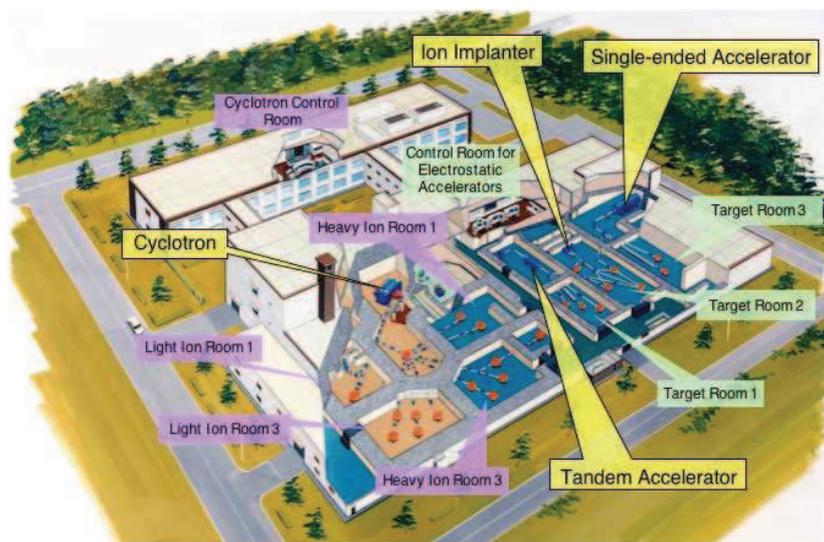


Figura 5.4. Instalación de TIARA (Japón).

²⁸ www.taka.jaea.go.jp/tiara/index.html

²⁹ K es una constante propia del Ciclotrón que viene dada por la rigidez magnética de su órbita exterior (para más información ver el Anexo II de este informe).

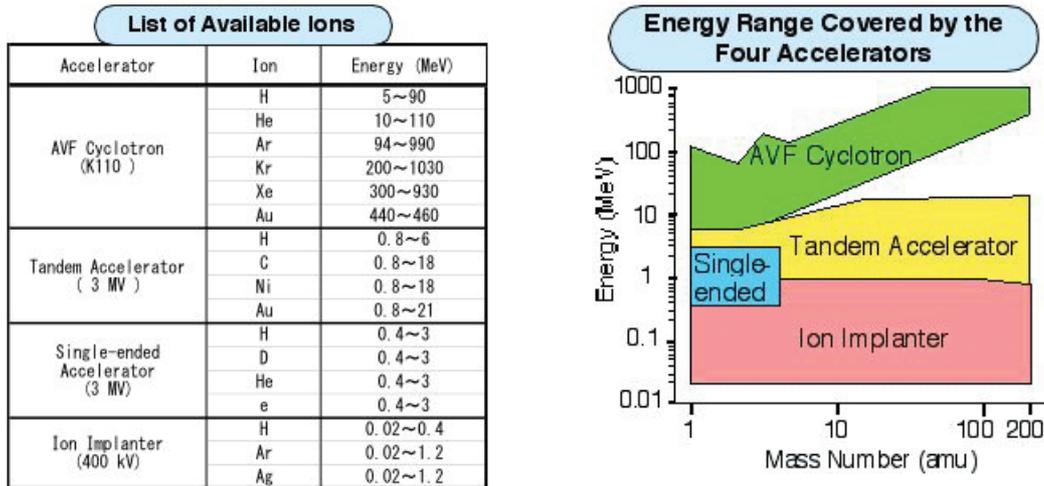


Figura 5.5. (Izquierda) Rangos de energía para los diferentes iones y para los diferentes aceleradores de partículas de la instalación TIARA. (Derecha) Gráfica de energía de los iones frente a la masa de los iones acelerados para los diferentes tipos de aceleradores de la instalación TIARA.

Tabla 5.2. Grupos de investigación del mundo dedicados a las tecnologías de irradiación.

Centros de Investigación	Tipos de aceleradores
JAERI Takasaki (Japón)	Responsable de la instalación TIARA
IAE Kyoto (Japón)	Acelerador Van de Graaff (1 MV) Acelerador Tandetron (1.7 MV) Acelerador Singletron (1 MV)
HIT Tokyo (Japón)	Acelerador Van de Graaff (3.75 MV) Acelerador Tandetron (1 MV)
CIRSE Nagoya University (Japón)	Implantador iónico de 200 kV Acelerador Van de Graaff (2 MV)
Hokkaido University, Sapporo (Japón)	Implantador iónico de 300 kV Microscopio TEM (1MV)
MSD, IGCAR Kalpakkam (India)	Implantador iónico (400 kV) Implantador Tandetron (1.7 MV)
FZ Rossendorf (Alemania)	Implantador iónico (500 kV) Implantador Tandetron (3 MV)
FSU Iena (Alemania)	Implantador iónico (400 kV) Implantador Tandem (3 MV)
Salford University (Reino Unido)	Implantador iónico (100 kV) Microscopio TEM (200 kV)
TIARA facility (Japón)	Acelerador ciclotrón AVF K110 Acelerador tandem (3 MV) Acelerador single-ended (3MV) Implantador iónico (400 kV)
JANNUS Saclay, (Francia)	Acelerador Epiméthée [Pelletron] (3 MeV) Acelerador Van de Graaff [Yvette] (2.5 MeV) Acelerador tandem [Japet] (2MeV)

El análisis anterior demuestra que el inventario de instalaciones relacionadas con la tecnología de aceleradores está limitado para altas energías de irradiación. Las energías elevadas son necesarias para hacer el estudio del daño por irradiación a

altos rangos de penetración, por lo que se hace necesario el aporte de nuevas instalaciones. En este contexto *TechnoFusión* (su Área de Implantación de Materiales) promete ser un Centro de referencia a nivel internacional al contar con aceleradores de iones pesados capaces de alcanzar energías de hasta 400 MeV.

5.4. Equipamiento previsto

5.4.1. Aceleradores de iones

El principal requisito que los aceleradores de iones ligeros de *TechnoFusión* deberán cumplir es la capacidad de irradiar los materiales con iones que pueden penetrar al menos unas decenas de micras en su interior. Además de esto, ha de garantizarse en todo momento la posibilidad de realizar una irradiación con un triple haz. Los aceleradores de iones ligeros más utilizados para el rango de energías deseado son los aceleradores electrostáticos del tipo *Van de Graaf* o *Pelletron*. Existe una cierta experiencia en España en este tipo de aceleradores puesto que actualmente se encuentran en funcionamiento varios de ellos en: CIEMAT, CMAM (Centro de MicroAnálisis de Materiales de Madrid) y CNA (Sevilla). Estos aceleradores pueden ser del tipo *single-ended*, con uno de los terminales a alta tensión, o del tipo *tandem*, con ambos terminales a baja tensión. En *TechnoFusión* deberán ser tipo *tandem* para asegurar que la fuente de iones no esté a alta tensión, permitiendo así más flexibilidad en los experimentos y admitiendo además energías finales más elevadas a igual potencial de terminal. Además, se considera que serán necesarias al menos dos fuentes de iones, una de radiofrecuencia, para iones en forma gaseosa, y otra de *sputtering* para iones sólidos.

En cuanto al acelerador de iones pesados, su objetivo es producir defectos en el material similares a los producidos por la radiación neutrónica pero sin introducir nuevas impurezas. Esto significa que hay que irradiar con iones del mismo material del que está hecha la muestra. Teniendo en cuenta que los principales materiales estructurales en estudio dentro del Programa Europeo de Fusión son los aceros, el W y el SiC, esto implica que el acelerador de iones pesados de *TechnoFusión* debe ser capaz de implantar al menos Fe, W y Si. No obstante, para asegurar que el rango de penetración en el material es el deseado la energía de los iones debe ser muy alta (al menos cientos de MeV), dando lugar a rangos entre 5 y 90 μm para los diferentes iones considerados (ver Tabla 5.3). Para energías de ese nivel pueden utilizarse aceleradores electrostáticos, similares a los de iones ligeros pero de energías más altas, o aceleradores tipo ciclotrón mucho más adecuados para el rango de energías requerido.

Los resultados obtenidos a través de los cálculos de simulación computacional previas a este informe (ver Anexo I) han demostrado que no son necesarias altas corrientes de iones ya que incluso con corrientes del orden de nA la tasa de implantación obtenida es suficiente para reproducir la tasa de formación de H y He inducida por los neutrones. Además, el rango de penetración deseado se obtiene con iones de energía de unos pocos MeV. En las Tablas 5.3 y 5.4 se muestra un resumen de los valores de energía de los distintos iones implantados en varios materiales, para alcanzar el mismo rango de penetración en el interior de cada material obtenidos en los cálculos de simulación computacional. En cada caso, uno de los tres aceleradores es el que limita la máxima penetración. En la Tabla 5.3 se presentan los valores

suponiendo que el ión He se acelera en estado de carga -1 en la primera etapa y +1 en la segunda, lo que le da una energía de 12 MeV. Como esta configuración limita bastante el rango de los iones pesados e H, se ha calculado también para unas cargas de He de -1 y +2, que es menos eficiente pero factible. Como se deduce de los nuevos resultados (Tabla 5.4) esta nueva energía permite aprovechar mucho mejor el potencial del Ciclotrón y alcanzar por tanto mayores profundidades. También es interesante notar que para el H no se sobrepasa el valor de 5 MeV para ninguno de estos casos, lo que podría rebajar el requisito de energía máxima de este acelerador tándem. Los valores subrayados en las Tablas indican que la relación ión/acelerador está limitando realmente la profundidad de irradiación.

Los resultados obtenidos de los cálculos de simulación anteriormente expuestos llevan a la conclusión de que para los experimentos que se desea llevar a cabo en el Área AIM *TechnoFusión* se requerirán tres aceleradores con las siguientes características:

- 1 acelerador de iones ligeros tipo tándem 6 MV de tensión en terminal para utilizarse con partículas alfa (He).
- 1 acelerador de iones ligeros tipo tándem 5 - 6 MV de tensión en terminal para utilizarse con protones (H).
- 1 acelerador de iones pesado (Ciclotrón) de $K = 110$ para utilizarse con iones pesados o protones de alta energía ($E_{\text{protones}} = \sim 20$ a 40 MeV, ver las energías máximas obtenidas para una $K=110$ en las Tablas 5.3 y 5.4)

Tabla 5.3. Energías de los iones que serán utilizados por los aceleradores de *TechnoFusión* suponiendo que la energía del He es menor o igual a 12 MeV (tándem 6 MV terminal y He -1 y +1)

Material irradiado	Profundidad (µm)	Acelerador iones pesados Ciclotrón k=110		Acelerador iones ligeros 5 MV		Acelerador iones ligeros 6 MV	
		Ion	Energía (MeV)	Ion	Energía (MeV)	Ion	Energía (MeV)
Fe (7.8 g/cm ³)	26.6	Fe	<u>385</u>	H	2.5	He	10
W (19.3 g/cm ³)	10.1	W	<u>373</u>	H	1.6	He	6
C (2.3 g/cm ³)	74.5	C	64	H	3.0	He	<u>12</u>
SiO ₂ (2.2 g/cm ³)	89.0	Si	210	H	3.1	He	<u>12</u>
SiC (3.2 g/cm ³)	63	Si	212	H	3.1	He	<u>12</u>
SiC (3.2 g/cm ³)	63	Si	212	D	4.0	He	<u>12</u>

Nota: las cifras subrayadas indican los valores limitantes de energía

Tabla 5.4. Energías de los iones que serán utilizados por los aceleradores de *TechnoFusión* suponiendo que la energía del He es menor o igual a 18 MeV (tándem 6 MV terminal y He -1 y +2)

Material irradiado	Profundidad (µm)	Acelerador iones pesados Ciclotrón k=110		Acelerador iones ligeros 5 MV		Acelerador iones ligeros 6 MV	
		Ion	Energía (MeV)	Ion	Energía (MeV)	Ion	Energía (MeV)
Fe (7.8 g/cm ³)	26.6	Fe	<u>385</u>	H	2.5	He	10
W (19.3 g/cm ³)	10.1	W	<u>373</u>	H	1.6	He	6
C (2.3 g/cm ³)	148	C	96	H	4.5	He	<u>18</u>
SiO ₂ (2.2 g/cm ³)	175	Si	337	H	4.6	He	<u>18</u>
SiC (3.2 g/cm ³)	122.4	Si	337	H	4.6	He	<u>18</u>
SiC (3.2 g/cm ³)	122.4	Si	337	D	6.0	He	18

Nota: las cifras subrayadas indican los valores limitantes de energía

Actualmente se evalúan los requisitos concretos (energía de los iones, corrientes, emitancias, etc.) que los aceleradores de *TechnoFusión* deberán cumplir:

- I) Energía de los iones: en la Tabla 5.5 se recogen los valores de las energías máximas disponibles para los iones más importantes que se prevén implantar.
- II) Corrientes: en las Tablas 5.6 se resumen las corrientes que han de alcanzarse para cada tipo de ión en ambos tipos de acelerador y la comparativa con los valores de los aceleradores de TIARA.
- III) Emitancias: la emitancia de un haz de partículas aceleradas se define como el volumen ocupado por estas partículas en el espacio de fases (espacio y momento) a medida que viaja. Un haz de baja emitancia es un haz en el que las partículas se encuentran bien confinadas y tienen casi el mismo momento. Un sistema de transporte sólo permite partículas con momento cercano al de su valor de diseño y, por supuesto, que puedan transitar espacialmente por el sistema de colimadores, tubos de vacío e imanes que componen el sistema. En la práctica una emitancia pequeña conlleva un mejor control del haz y mayor luminosidad.

Para los aceleradores tipo tándem, un valor de emitancia de trabajo encontrado en la literatura es $3.5 \pi \text{ mm} \times \text{mrad}$ para un haz de protones a 1 MeV.

Para el Ciclotrón se dispone de los valores proporcionados por la empresa DREEBIT obtenidos en un estudio de viabilidad llevado a cabo por la ingeniería Elytt Energy. La emitancia en el blanco es $< 20 \pi \text{ mm} \times \text{mrad}$. Este valor se toma como válido para una primera fase, hasta definir su variación con el tipo de iones y su estado de carga.

- IV) Homogeneidad del haz: para conseguir irradiaciones homogéneas en áreas relativamente grandes, los aceleradores deberán contar con sistemas de barrido del haz y para ello se necesitan unas distancias mínimas considerables.

En estos momentos se evalúa cuales son los sistemas de barrido más apropiados, y además se estudia la posibilidad de introducir un difusor después del degradador, y los problemas de protección radiológica que esto trae consigo.

- V) Ángulos de incidencia sobre la muestra: hoy en día no es posible irradiar con tres haces paralelos a un mismo tiempo por lo que un factor importante a tener en cuenta es el máximo ángulo permitido entre los haces de iones. En TIARA, existe la posibilidad de irradiar con 3 haces de iones que están en un mismo plano, con ángulos de 15° entre sí.

En *TechnoFusión* se contempla la posibilidad de que los tres haces no estén en un mismo plano, lo que permitiría minimizar el ángulo de incidencia entre los tres haces. Además, se considera la prioridad del haz de iones pesados como haz de incidencia normal para evitar cualquier tipo de *sputtering* en la muestra.

- VI) Líneas de extensión: la determinación de los aceleradores viene marcada por una línea de extensión en particular, la de irradiación con triple haz. Además de la definición de los aceleradores, es necesario definir qué tipo de líneas accesorias se van a montar ya que éstas determinarán también las condiciones de edificio.

Es necesario hacer un estudio sobre los elementos necesarios para el guiado del haz a través de las distintas líneas. Parámetros como las energías de los iones y los ángulos a los que estos se deseen deflectar determinarán el dimensionamiento de elementos como los dipolos de deflexión, deflectores, etc.

- VII) Suministros: tanto para los aceleradores como para las líneas son necesarios una serie de suministros como refrigeración, nitrógeno líquido, aire comprimido, etc. La evaluación de parámetros como el vacío necesario, el calor disipado o las temperaturas de trabajo, se pueden realizar en primera instancia tomando como referencia otros aceleradores similares como es el caso del CMAM³⁰.

Asimismo, se creará una planta técnica bajo la planta principal de los aceleradores, de forma que los suministros eléctricos, de vacío, gases, etc. puedan llegar directamente a los puntos necesitados.

- VIII) Aspectos de protección radiológica: como puede verse en el Anexo I, existen simulaciones computacionales para la determinación de las tasas de radiación en distintas etapas de operación con el fin de calcular los blindajes de radiación en el edificio y cómo estos blindajes afectan a la ubicación de los aceleradores, los suministros, las líneas de extensión, etc.

³⁰ Documento Interno CMAM A-4-35-174-0049. Installation Requirements and Recommendations.

Tabla 5.5. Valores de energías máximas disponibles para los iones previstos para ser implantados en *TechnoFusión*

	Aceleradores iones ligeros Tandem			Acelerador iones pesados Ciclotrón k=110				
	Iones importantes			Iones importantes				
	H	D	He	C	Si	Fe	W	H
A	1	1	1	12	28	56	184	1
Z	1	2		4	9	14	25	1
E (MeV)	10 a 12	2 a 6*	10 a 18	96	337.	385.	373.	Hasta ~ 40
* Posiblemente limitado por activación del material								

Tablas 5.6. Corrientes deseables para cada tipo de ión en los aceleradores tipo tándem y el Ciclotrón previstos para *TechnoFusión*. Datos en corrientes de partícula (iones/s).

	Aceleradores iones ligeros Tandem
	Corrientes (pnA)
H	50 – 100
D	~ 10
He	50 – 100

	Acelerador iones pesados Ciclotrón k=110	Ciclotrón TIARA
	Corrientes (pnA)	Corrientes (pnA)
C	500 – 1 μ A	660 (q* = 3) 80 (q = 5)
Si	200	15 (q = 10)
O	200	750 (q = 4) 250 (q = 6)
Fe	25	120 (q = 11) 35 (q = 15)
W	3	60 (q = 9)

Los requisitos anteriormente expuestos que definen las características necesarias de los aceleradores de iones del Área AIM de *TechnoFusión* reiteran la necesidad de la adquisición de dos aceleradores de iones ligeros tipo tándem de 5-6 MV, uno para implantar iones H y otro para implantar iones He y la adquisición de un acelerador de iones de tipo ciclotrón para iones pesados y/o protones de alta energía con una K en el entorno a 110. Es absolutamente imprescindible la adquisición de los dos aceleradores ya que la implantación de H e He debe ser simultánea.

A continuación se presenta una breve descripción de los aceleradores de iones propuestos para la instalación *TechnoFusión*.

5.4.1.1. Aceleradores de iones ligeros con neutralizador

Existen distintas empresas en el mercado (NEC (USA), TOSHIBA (Japón), HIGH VOLTAGE (Holanda)) capaces de suministrar aceleradores electrostáticos Van de Graaf tipo tándem de 5-6 MV con plazos de entrega del orden de 1 año. Aunque no es estrictamente necesario se propone que los dos aceleradores de iones ligeros sean iguales de modo que la instalación gane, de nuevo, en flexibilidad y sea de mantenimiento más sencillo. La Figura 5.6 muestra un ejemplo de uno de los aceleradores de ese tipo fabricado por la empresa NEC.

La neutralización de los iones (necesaria para poder irradiar materiales sometidos a un campo magnético) se obtiene haciendo pasar dichos iones por una cámara con un gas de electrones cuasi-libres o electrones débilmente ligados, de modo que pueda producirse un intercambio de carga mediante interacciones de baja energía. Este tipo de tecnología se utiliza habitualmente en muchas máquinas de física de plasma ya que el sistema de calentamiento que se basa en los inyectores de neutros requiere hacer esta operación de forma muy eficiente. En su momento, será necesario realizar un análisis más detallado pero se considera que el grado de neutralización requerido en esta instalación se podrá conseguir fácilmente mediante un diseño similar al utilizado en los citados inyectores de neutros.



Figura 5.6. Acelerador electrostático tipo tándem de 4 MeV fabricado por NEC.

5.4.1.2. Acelerador de iones pesados

De acuerdo con la evaluación realizada (ver Anexo II) un Ciclotrón con una k alrededor de 110 es capaz de acelerar los iones mencionados hasta las altas energías necesarias a un coste menor, por lo que se propone, como primera opción, la construcción de un Ciclotrón de $k = 110$ de esas características.

Para el diseño y la construcción de este Ciclotrón de $k = 110$ se barajan diferentes opciones:

- a) IBA Group (Bélgica)³¹, es una empresa que fabrica ciclotrones de hasta sólo $k = 70$ (Figura 5.7) pero han mostrado un importante interés en el desarrollo de un Ciclotrón de las características requeridas para *TechnoFusión*.
- b) El grupo del MIT (*Massachussets Institute of Technology* – EE.UU.), que posee una amplia experiencia en el diseño y la construcción de diversos ciclotrones. Últimamente se han especializado en versiones de bobinas superconductoras, lo cual supone una disminución notable del tamaño del imán. Esto, además de disminuir drásticamente el espacio necesario, permite un importante ahorro en la cantidad de hierro para el núcleo del imán. Esta solución muy compacta con un *cryocooler* incorporado es técnicamente muy interesante y dicho grupo ha mostrado también su interés en el proyecto.
- c) *Elytt Energy* (España). El Anexo II muestra un análisis de las dimensiones y costes de un acelerador de iones pesados de estas características llevado a cabo por esta ingeniería española.

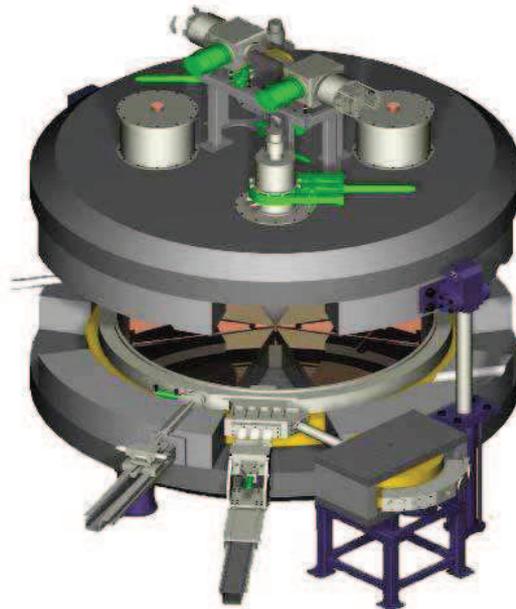


Figura 5.7. Esquema del acelerador de iones pesado tipo ciclotrón Cyclone 70 (IBA).

³¹ [www. iba-worldwide.com](http://www.iba-worldwide.com)

5.4.2. Acelerador de electrones

De acuerdo con las estimaciones llevadas a cabo³² una corriente de 1 mA de electrones de 10 MeV incidiendo sobre una lámina de aluminio de 1 cm de espesor genera un campo de radiación *gamma* de 700 Sv/h a una distancia de 3 m. Estos resultados indican, a pesar de realizarse suponiendo una fuente puntual, que mediante la utilización de una fuente extensa (irradiando con el haz de electrones un área extensa o dividiendo el haz en varios haces menores) sería posible obtener una tasa de dosis del orden de 100 a 500 Sv/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.

Para el Área AIM de *TechnoFusión* se ha pensado la adquisición de un **acelerador de electrones tipo Rhodotron** (Figura 5.8). El Rhodotron trabaja a energía fija, con un máximo valor de 10 MeV. Este tipo de acelerador puede fabricarse con múltiples líneas de haz (por ejemplo 10, 5 y 3 MeV), aunque todas ellas fijas. La corriente de este equipo es variable y extremadamente estable, moviéndose en el intervalo de 3 mA (modelo TT-100) hasta 100 mA (modelo TT-1000). El inconveniente de este equipo es precisamente el valor de energía fija. Para solventar parcialmente este problema se podrían añadir salidas intermedias a otros valores de energías pero éstas también serían fijas, es decir, no es posible tener un barrido de energías. El haz del Rhodotron puede extraerse justo en la zona de los imanes. Al ganar 1 MeV en cada etapa, se puede extraer un haz intermedio con energía de 1, 2, 3,... hasta 9 MeV si se trata del equipo de energía máxima de 10 MeV. En esta última etapa se puede extraer toda la corriente. No obstante, no es posible extraer valores de energía fraccionados sino que deben emplearse valores enteros, siendo el mínimo 1 MeV. El diámetro del haz a la salida del acelerador para el Rhodotron se encuentra entre 2 y 4 mm. Utilizando un conjunto adicional de colimadores el diámetro del haz se podría reducir por debajo de estas dimensiones.

Es interesante destacar que la empresa IBA que comercializa el Rhodotron incluye un sistema para abrir el haz de electrones y convertirlo a radiación *gamma* (denominado sistema de *scanning* combinado con un blanco de tántalo/hierro refrigerado por agua). La distribución de radiación obtenida se muestra en la Figura 5.9. Puede abrirse a distancias de 1 m o superiores. Para el Área de Tecnologías de Manipulación Remota de *TechnoFusión*, usuaria de este acelerador, el sistema debería ampliarse también en la otra dirección perpendicular para obtener un perfil más cuadrado y por tanto más uniforme.

³² "Evaluación de la dosis de radiación ionizante producida por el acelerador de electrones de TechnoFusión". Informe interno.



Figura 5.8. Acelerador de electrones del tipo Rhodotron (IBA) de 10 MeV de energía máxima.

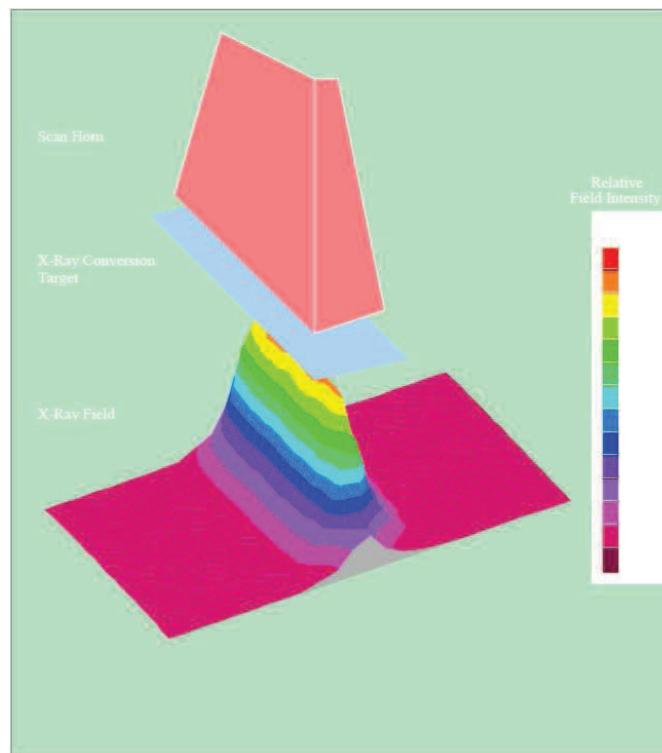


Figura 5.9. Distribución espacial de la intensidad de radiación *gamma* a la salida del convertidor de electrones con sistema de barrido. Imagen cortesía de IBA.

5.4.3. Imán de alto campo magnético

El objetivo de la bobina de alto campo magnético es permitir la irradiación de materiales en presencia de campos estacionarios del orden de los que se manejan en ITER (entre 5 y 10 T). El único requisito técnico de relevancia (además de la intensidad del campo magnético) es que el volumen disponible para colocar los materiales a irradiar debe ser suficientemente grande como para permitir introducir un portamuestras con control de temperatura y los sensores necesarios para caracterizar el material durante la irradiación. En principio, se considera que un diámetro interno del orden de 20-30 cm sería suficiente. Se necesita al menos una zona de 10 cm de longitud con campo constante, con lo que la bobina deberá ser de unos 30 cm de largo. Una bobina con estas características sólo puede ser de material superconductor. No obstante, esto no supone ningún impedimento dado que existen compañías (como por ejemplo *Oxford Instruments*) que fabrican productos estándar de hasta 20 T y que cumplen las especificaciones mencionadas.

5.4.4. Sala de ensayos bajo radiación

La sala de ensayos bajo radiación será un laboratorio convencional con el blindaje y demás sistemas necesarios para habilitar el manejo remoto de materiales irradiados. En ella se deberá poder realizar las operaciones necesarias para caracterizar los materiales irradiados, al menos mediante microscopía electrónica y nanoindentación. Deberá estar dotada de los adecuados sistemas de vigilancia y control radiológicos. En el capítulo 9 de este informe se dará información más detallada a cerca de este tipo de salas y de las características especiales que deben cumplir.

5.5. *Capacidad experimental*

El conjunto de técnicas de modificación del Área AIM de *TechnoFusión* permitirá llevar a cabo diversos experimentos tales como:

- Evaluación del efecto de la radiación neutrónica en los materiales candidatos para emplearse en los futuros reactores de fusión.
- Evaluación del efecto conjunto de la radiación y el campo magnético los materiales anteriormente mencionados.
- Estudio de la evolución de riesgo radiológico.

En el capítulo 2 de este documento se incluye una descripción detallada de dichos experimentos.

5.6. **Requerimientos de espacios físicos, instalaciones y seguridad**

(I) Espacios físicos e instalaciones requeridas

El edificio de *TechnoFusión* que albergará a los aceleradores, su/s correspondiente/s sala/s de irradiación y el imán de alto campo del Área AIM vendrá condicionado principalmente por las dimensiones y características de estos equipos así como por las técnicas a utilizar, especialmente cuando se realicen irradiaciones con triple haz.

En la Figura 5.10 se muestra un esquema del conjunto de aceleradores de iones (*tándem* de iones ligeros y Ciclotrón) y su disposición en las instalaciones del Área AIM. Para la configuración de los aceleradores y las salas de irradiación escogida se estima que será necesaria una instalación con unas dimensiones aproximadas de 61 x 60 x 6 m³. En este dimensionamiento se ha tenido en cuenta el enorme blindaje que necesitará el edificio al tratarse de una instalación radiactiva. Como ejemplo del tamaño de dicho blindaje, en la Figura 5.11 se muestra un plano de las dimensiones del Ciclotrón modelo Cyclone 70 (IBA), donde se han considerado los muros de hormigón de 3 m de espesor necesarios para evitar fugas radiológicas.

Para el mismo modelo de Ciclotrón, en las Tablas 5.7 y 5.8 se recogen las principales características que ha de cumplir la habitación donde se instale el acelerador así como las instalaciones accesorias necesarias para su correcto funcionamiento. Por similitud, el Ciclotrón propuesto para *TechnoFusión* deberá contar con unas infraestructuras parecidas a las anteriores así como tener en cuenta las especificaciones recogidas en estas tablas.

En cuanto al acelerador de electrones Rhodotron, se necesitará unas dimensiones mínimas para su ubicación de 6 x 6 x 5 m³, del orden de 300 kW de consumo eléctrico y un sistema de refrigeración adecuado, junto con las adecuadas medidas de blindaje, vigilancia y control radiológicos. Esta nave que albergará al Rhodotron deberá ser lo suficientemente grande y flexible como para que pueda adaptarse a los diferentes tipos de procedimientos propuestos. En principio se propone una nave con dos áreas de trabajo: en la primera, de unos 30 x 20 x 10 m³, se realizarían pruebas prototípicas de los procesos de mantenimiento remoto sin la presencia de radiación, mientras que en la segunda, de unos 10 x 10 x 5 m³, se realizarían los procedimientos de cualificación en presencia de radiación. El Área AIM de *TechnoFusión* tendrá consideración de instalación radiactiva y, por tanto, deberá contar con los sistemas de vigilancia y control asociados.

Uno de los principales valores añadidos de la instalación propuesta consiste en la disponibilidad *in situ* de un conjunto significativo de técnicas de medida y métodos de simulación de las condiciones presentes en un reactor de fusión (altos flujos de calor, irradiación, etc.) únicos en Europa y el mundo. Esto significa que la instalación que ubique esta Área de experimentación de *TechnoFusión* deberá estar organizada de forma muy flexible para permitir la realización de diferentes tipos de experimentos en distintas zonas experimentales con pequeños cambios y procesos de adaptación lo más sencillos posibles. Será necesario dedicarle una especial atención a este aspecto durante la fase de diseño detallado de la instalación.

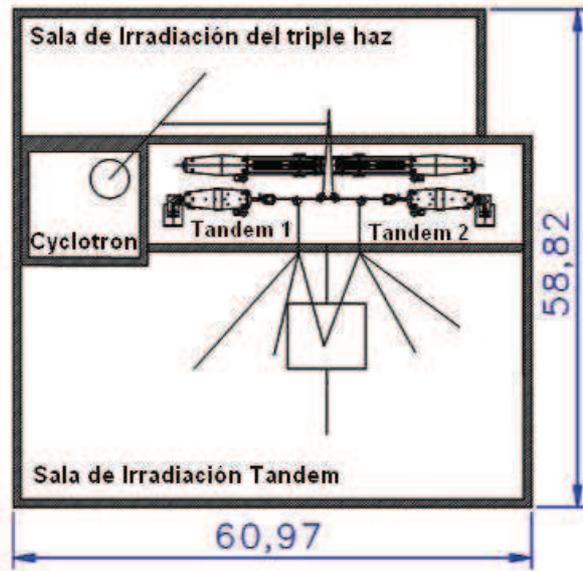


Figura 5.10. Esquema conceptual del conjunto de aceleradores de iones de *TechnoFusión*

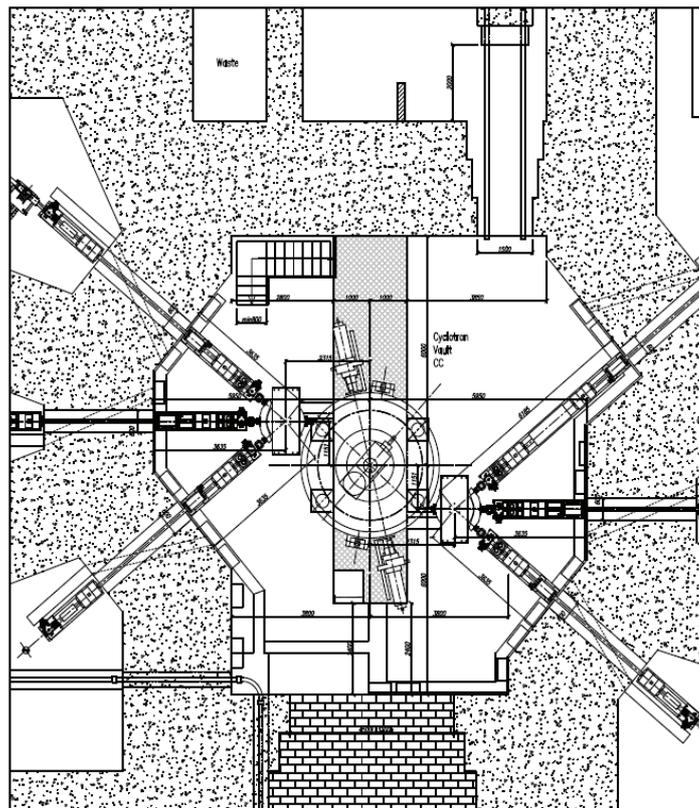


Figura 5.11. Dimensiones de la bóveda y de las salas de irradiación del Ciclotrón para el modelo Cyclone 70 (IBA)

Tabla 5.7. Configuración de la habitación recomendada para la instalación de un Ciclotrón modelo Cyclone 70 (IBA)

Ciclotrón modelo Cyclone 70 (IBA)	
Habitáculo del Ciclotrón	<p>Dimensiones internas (mínimas.): 8 m x 12 m x 5.4 m</p> <p>Puerta apertura: 1.5 m (alto) x 2 m (ancho)</p> <p>Las dimensiones del habitáculo del Ciclotrón y de las salas de irradiación dependerán además del sistema de configuración.</p> <p>Blindaje recomendado para la bóveda: Paredes exteriores de las salas de irradiación: 3.7 m espesor Paredes entre las salas de irradiación: 3 m espesor Paredes externas de la bóveda del Ciclotrón: 3 m espesor (densidad: 2.35 t/m³)</p> <p>Carga soportada por el suelo: 140 toneladas sobre 4 pilares (Ciclotrón) 2*10 toneladas sobre 4 pilares (flexión imán)</p> <p>Drenajes del suelo: Tal como exija el código local de salud y con sujeción a las normas de seguridad. Dimensiones del foso: 2.1m profundidad x 2m ancho x 10m mínimo longitud. El foso debe tener una entrada y estar conectado por cables a la sala de la fuente de alimentación.</p> <p>Intervalo de temperatura: +17 a +25 °C Intervalo de humedad: 35% a 65%, sin condensación Potencia disipada en el aire: menos de 15 kW</p>
Habitáculo de las salas de irradiación	<p>Dimensiones: (uso acordado) * 2.5 m (altura)</p> <p>Puerta de apertura: 1.2 m (ancho) x 2 m (altura)</p> <p>Intervalo de temperatura: +17 a +25 °C Intervalo de humedad: 35% a 65%, sin condensación Potencia disipada en el aire: 2 kW</p>
Habitáculo de la fuente de alimentación	<p>Dimensiones internas: área: 70 m², altura libre: 3 m</p> <p>Intervalo de temperatura: +17 a +25 °C Intervalo de humedad: 35% a 65%, sin condensación Potencia disipada en el aire: 23 kW (en operación) 5 kW (en parada)</p> <p>La fuente de alimentación, salas de control y Ciclotrón se encontrarán muy cerca unos de otros con el fin de evitar el uso de cables largos. Se estipula que no habrá más de 30 metros de distancia entre los unos y los otros.</p> <p>La sala de la fuente de alimentación estará equipada con un piso elevado (40 cm de altura) con una 2T / m de capacidad de carga.</p>
Sala del sistema de refrigeración del Ciclotrón	<p>El sistema de refrigeración deberá estar ubicado lo más cerca posible de la habitación del Ciclotrón, con acceso a un suministro de agua.</p> <p>Una zona de 6 m es suficiente para alojar el intercambiador de calor y la bomba (1,6 m x 1,4 m mínimas dimensiones). La zona deberá ser de fácil acceso para la prestación de servicios al equipo.</p> <p>Ubicar el sistema de refrigeración en un nivel diferente del Ciclotrón es posible a una altura máxima diferencia de 7 m sobre el nivel del plano medio del Ciclotrón (por ejemplo, sobre la bóveda del techo).</p>
Criobomba Compresora	<p>La unidad compresora, con un peso de 90 kg (anchura: 445 mm, profundidad: 630 mm, altura: 475 mm) se ubicará en una plataforma fuera de la habitación del Ciclotrón o dentro de la sala. La longitud de las conexiones desde el compresor a la criogénica no debe superar los 30 metros.</p>

Tabla 5.8. Especificaciones de las instalaciones auxiliares necesarias para un Ciclotrón modelo Cyclone 70 (IBA)

Especificaciones de las instalaciones auxiliares	
Instalación Eléctrica	<p>400 V \pm5% (entre fase y fase), 50-60 Hz \pm2 Hz, tres fases de corriente alterna + neutro + toma de tierra. Potencia suministrada en función del consumo de energía, y sujeto a la regulación local.</p> <p>Para 70 MeV, dos líneas de haces (500 μA): Potencia consumida: 500 kVA Potencia suministrada: 600 kVA</p> <p>Potencia distribuida entre: la cabina de distribución de potencia del IBA [330 kVA], el amplificador final de ánodos [74 kVA], la fuente de alimentación y la fuente de alimentación de la bobina principal, en la sala de alimentación.</p>
Requisitos del agua de refrigeración	<p>Suministro normal de agua corriente en la sala de refrigeración. Necesidad de desagües respetando los códigos de edificación.</p> <p>Presión: entre 2 y 5 bar. Caudal: 370 l/min. Temperatura: entre 7 $^{\circ}$C y 20 $^{\circ}$C. Potencia a refrigerar: < 262 kW (doble haz, 500μA 70 MeV). Conexión con el intercambiador de calor: DN 50 acero inoxidable.</p> <p>La potencia será adaptada a los parámetros del Ciclotrón.</p>
Aire comprimido para el mecanismo de la válvula	<p>Presión: entre 500 kPa y 700 kPa. Calidad: filtrado, seco y exento de aceites. Caudal medio: < 2 l/min. Caudal máximo: < 200 l/min. Punto de rocío: > 10 $^{\circ}$C por debajo de T ambiente</p> <p>Tanque auxiliar de aire comprimido, o nitrógeno comprimido, con al menos 0.5 m³ de capacidad, para permitir el cierre de válvulas en caso de fallo de potencia. Instalación de diferentes puntos de conexión, en el edificio, de acuerdo con las recomendaciones del IBA.</p>
Nitrógeno seco para el Ciclotrón y para la fuente de ventilación iónica	<p>Presión: entre 50 y 100 kPa.</p> <p>Volumen: Para ventilación del Ciclotrón: 8 m³ (STP). Para fuente de ventilación iónica: 0.3 m³ (STP).</p> <p>Calidad: filtrado, seco y a temperatura de la sala.</p>
Gases para la fuente iónica (hidrógeno, deuterio y helio)	<p>Presión: entre 100 y 200 kPa. Calidad: 99,9997%. Oxígeno, de calidad industrial, para deflector electrostático.</p> <p>Los gases se enviarán al colector del Ciclotrón mediante una tubería de acero inoxidable electropulida, que evite la contaminación por el gas. Limpieza de partículas de la tuberías, con antelación a su instalación al equipamiento del IBA.</p>

(II) Requerimientos de seguridad

Además de incluir el tipo de daño generado en las muestras y los procedimientos a utilizar para conseguirlo, será necesario hacer una evaluación precisa de los riesgos en cuanto a la radiación producida durante la operación de estos aceleradores (generación de fotones y neutrones de alta energía). Será necesario también determinar la cantidad de isótopos tanto radiactivos como estables producidos en algunos materiales base para obtener información de i) la activación al final de la irradiación de las muestras que proporcionará información de la fuente de *gammas* y neutrones y, por consiguiente, del tipo de blindaje necesario, y ii) sus tiempos de decaimiento que facilitarán información del tipo de accesibilidad de los experimentos.

La instalación requerirá para su operación fuentes de alta tensión que deberán encontrarse aisladas eléctricamente en jaulas de Faraday con todos los sistemas de protección adecuados para la correcta operación de las mismas (seccionadores, bloqueadores, etc.) impidiendo el acceso cuando se encuentren activas; debiendo estar todos los equipos a tierra para permitir el acceso (tanto a las fuentes como al dispositivo experimental).

Debido a la presencia de fuertes campos magnéticos, como el asociado al Ciclotrón (6 – 7 T) o el producido por el imán de alto campo (5 – 10 T), el acceso a la zona experimental durante la operación deberá estar restringido cuando el campo magnético esté activado. No se conocen efectos duraderos sobre la salud debido a la exposición a campos magnéticos elevados³³. Es posible realizar trabajos a exposiciones de hasta 2 T. No obstante, en relación a este riesgo la OMS recomienda una exposición durante la jornada laboral menor o igual a 200 mT con un valor máximo de 2 T, la instalación de señales indicativas de la presencia de fuertes campos magnéticos así como la prohibición del acceso a la instalación de personas portadoras de marcapasos cardíacos, implantes ferromagnéticos y dispositivos electrónicos (estas indicaciones deben disponerse en lugares con campos magnéticos menores de 0,5 mT) y la prohibición de la introducción en las zonas donde el campo pueda superar 3 mT de cualquier herramienta y/o elemento ferromagnético que pueda ser proyectado dañando equipos y/o personas.

Otros peligros adicionales en la instalación serán el riesgo eléctrico, riesgo magnético o el riesgo químico (gases inflamables, comburentes y/ o tóxicos como D₂, H₂, He, N₂, SF₆, etc.).

El empleo de diferentes gases (inflamables, comburentes, tóxicos, etc.) hará necesario una separación de la zona de ensayos suficientemente grande en función de su peligrosidad. Además, será necesario su correcta ventilación y protección de fuentes de calor y de la luz solar directa. En la zona dónde se almacenen los gases inflamables la instalación eléctrica, si la hubiera, se realizará de acuerdo a la normativa. Se separarán las botellas vacías de las llenas. Los gases se transportarán desde la zona de almacenamiento hasta las instalaciones mediante canalizaciones herméticas cuyo montaje permita una amplia versatilidad en el empleo de estos gases manteniendo un nivel de seguridad aceptable. En el interior de la instalación debe haber detectores de gases (H, He, SF₆, nivel de O₂, etc.) e incendio así como las medidas antiincendios adecuadas.

³³ OMS "Campos electromagnéticos y salud pública". www.who.int/mediacentre/factsheets/fs299/es/index.html

Otro de los riesgos presentes es la presencia de líquidos criogénicos en la instalación. Los riesgos asociados más importantes son el frío extremo y la asfixia.

Por último, al tratarse de una instalación experimental, los riesgos asociados pueden variar durante la explotación de la misma. Por ello se deberán contemplar las medidas de protección de equipos y personas adicionales que puntualmente se requieran en actividades relacionadas con el empleo de la máquina. En este sentido el AIM deberá cumplir la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (BOE nº 269, 10/11/1995 (R.D. 31/1995)).

Anexo I: cálculos de simulación computacional de irradiaciones de triple haz para el diseño conceptual de los aceleradores de iones de *TechnoFusión*

A continuación se incluyen tres bloques temáticos diferentes, aunque todos ellos centrados en el sistema de irradiación de materiales mediante un triple haz, en los que se presentan los resultados de las simulaciones y caracterizaciones realizadas. Estos resultados previos son necesarios para comenzar con el diseño de los aceleradores que incluirá el Área experimental de Irradiación de Materiales de *TechnoFusión* y llegar a su desarrollo final. En este primer bloque se analizan tres aspectos diferentes:

I) Cálculo de los parámetros básicos de operación de los aceleradores de iones necesarios en el futuro triple acelerador de *TechnoFusión*: Diseño conceptual.

II) Activación, transmutación y cálculo de daño primario en materiales irradiados en *TechnoFusión* en las condiciones esperadas.

III) Análisis de niveles de radiación en el entorno de muestras irradiadas.

1.1. Diseño conceptual de los aceleradores de iones: cálculo de intensidades y energías necesarias en el futuro triple haz

En este apartado se debe, por un lado, validar el método de la triple irradiación con iones y por otro calcular sus parámetros básicos (al menos el intervalo de los mismos). El primer punto se hace comparando el daño generado por colisiones en un determinado blanco y la cantidad de helio que se debe implantar para reproducir lo más fielmente posible el efecto de los neutrones de fusión. Después se realiza un análisis cuantitativo para determinar las corrientes y energías de iones necesarias en cada acelerador.

Para estos estudios se han utilizado los códigos SRIM (código estadístico de colisiones binarias) y MCNPX2.6b (código estadístico de Monte Carlo de transporte de neutrones y iones ligeros).

Los valores de 40 y 70 MeV se han escogido como puntos de partida, ya que 40 MeV es la energía máxima esperada para los protones en el modelo inicial de Ciclotrón escogido y 70 MeV es un valor sugerido por algunos autores como conveniente para este tipo de irradiaciones.

1.1.1. Rangos de penetración

En este apartado se muestran los resultados obtenidos usando el código SRIM, al calcular los rangos de penetración de varios iones en los diferentes materiales estudiados.

El SRIM toma valores de energías mínimas de desplazamiento de aproximadamente 15 eV para semiconductores y 25 eV para metales. Para materiales frágiles como los polímeros los valores se encuentran entre 2 – 5 eV. Este código recomienda además que aquellos usuarios que tengan experiencia en el cálculo del daño por irradiación en materiales, modifiquen los anteriores valores para un mejor ajuste. En la Tabla I.1 se exponen las energías mínimas de desplazamiento y las densidades utilizadas para realizar los cálculos para los diferentes materiales estudiados.

Tabla I.1. Energías mínimas de desplazamiento y densidades utilizadas

Material blanco	SiC ¹⁶³		W ¹⁶⁴	Fe ^{165, 166}	SiO ₂ ¹⁶⁷		Grafito ¹⁵
Energía mínima de desplazamiento (eV)	C	20	68	40	Si	35	31
	Si	35			O	20	
Densidad (gr/cm ³)	3.20		19.35	7.86	2.20		2.30

En el conjunto de Figuras desde I.1 a I.5 se muestran los rangos obtenidos en Fe, W, SiC, SiO₂ y grafito. Estos materiales se han escogido por ser representativos de los que habrá que estudiar en *TechnoFusión* y cubren un amplio abanico de densidades. En cada gráfica se representa la distancia de implantación para los iones constituyentes (acelerados a varios cientos de MeV) en cada caso y el H y He como caso común a todos. Como puede verse el caso más desfavorable es el W (Figura I.4), en el que el daño es muy superficial. En el otro extremo, en el grafito y el SiC (Figuras I.2 y I.5) se pueden cubrir profundidades de varias decenas de micras sin problema.

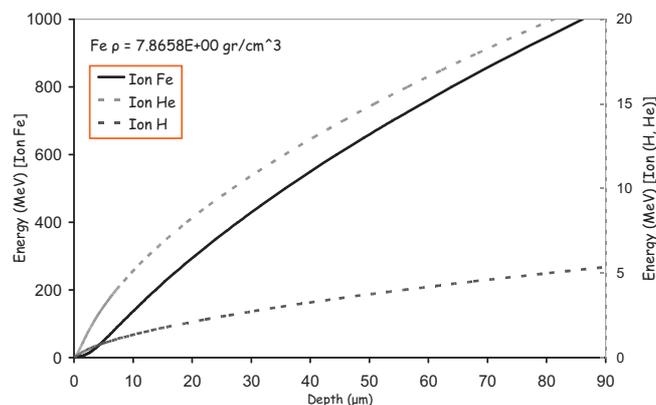


Figura I.1. Rangos de penetración en Fe.

¹⁶³ G. Lucas, L. Pizzagalli "Comparison of threshold displacement energies in β -SiC determined by classical potentials and initio calculations" Nuclear Instruments and Methods in Physics research B 229 (2005) 359-366.

¹⁶⁴ Q. Xu, T. Yoshiie, H.C. Huang, "Molecular dynamics simulation of vacancy diffusion in Tungsten induced by irradiation" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 2006 (2003) 123-126.

¹⁶⁵ J. Marian de Diego, "Improved understanding of radiation damage in Ferritic Alloys: A Multiscale Modeling Study" Tesis doctoral. ETSII, Universidad Politécnica de Madrid (2002).

¹⁶⁶ Simakov, FZKA 6743 (2002).

¹⁶⁷ Fernando Mota "Estudio mediante dinámica molecular de la generación y movilidad de defectos en Sílice amorfa bajo irradiación: mecanismos a altas energía y en presencia de Hidrógeno" Tesis doctoral, E.T.S.I.I. Universidad Politécnica Madrid (2008).

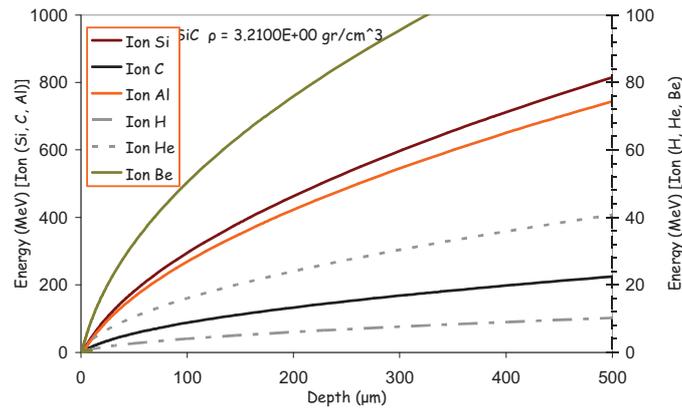


Figura I.2. Rangos de penetración en SiC.

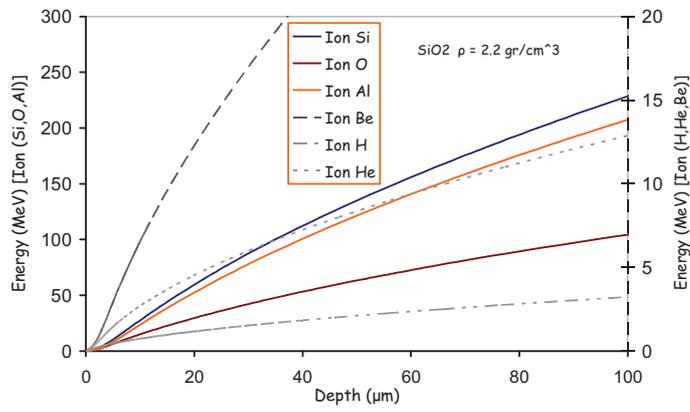


Figura I.3. Rangos de penetración en SiO_2 .

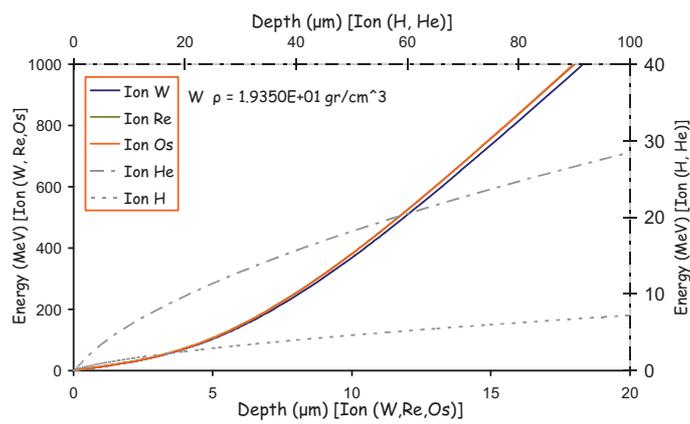


Figura I.4. Rangos de penetración en W.

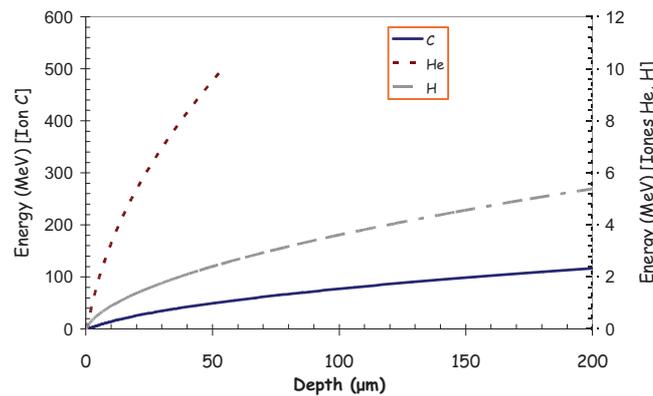


Figura I.5. Rangos de penetración en Grafito.

I.1.2. Análisis del daño generado y He y H implantados en función de la penetración

(I) Penetración de iones pesados y cálculo de dpa_s .

El daño depositado en el material se representa con la magnitud dpa . Esta unidad mide los desplazamientos que sufren los átomos de un material al impactar sobre él partículas procedentes de un acelerador. 1 dpa indica que todos los átomos del material se han desplazado al menos una vez.

Para alcanzar valores significativos para fusión debe poderse producir alrededor de 1 dpa/semana, por lo que los cálculos se establecen con esta condición. La ecuación I.1 se utiliza para calcular la intensidad para obtener 1 dpa/semana.

$$\frac{dpa}{Ion \text{ Incidente}} \cdot cm^2 = \frac{Vacantes}{cm \cdot Ion} \cdot \frac{1}{\rho[atoms/cm^3]}$$

ec. I.1

$$I \left[\frac{Iones}{s \cdot cm^2} \right] = \frac{1dpa / 3600 \cdot 24 \cdot 7s}{Max \ de \ Distrib \left[\frac{dpa}{(Ion \ Incidente)} \cdot cm^2 \right]}$$

A continuación en las Figura desde I.6 a I.11 se muestran una serie de gráficas en las que se representan los dpas en función de la penetración del ion implantado y para una intensidad de 1mA.

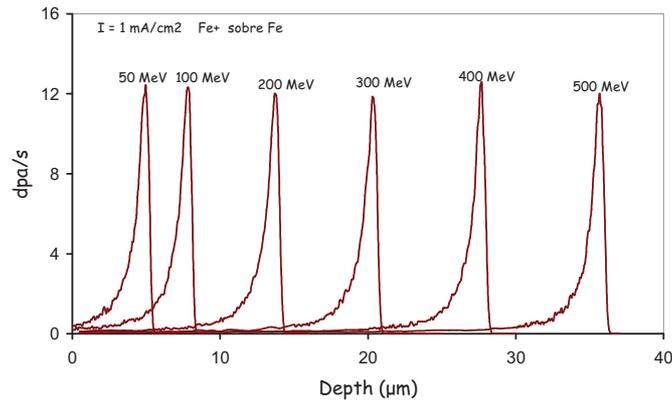


Figura I.6. dpa/s generados en Fe por PKAs de Fe+ en función de la distancia para diferentes energías de lanzamiento y para una intensidad de $I = 1 \text{ mA}$. Densidad = $8.481 \text{ E}22 \text{ átomos/cm}^3 = 7.865 \text{ g/cm}^3$

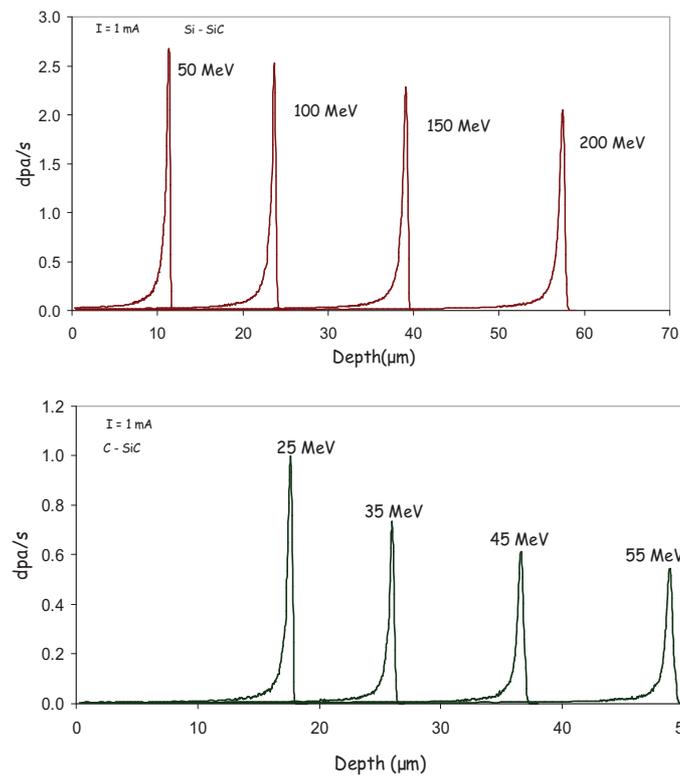


Figura I.7. dpa/s generados por los dos tipos de PKA en el SiC. Densidad = $9.611 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3 = 3.2 \text{ g/cm}^3$

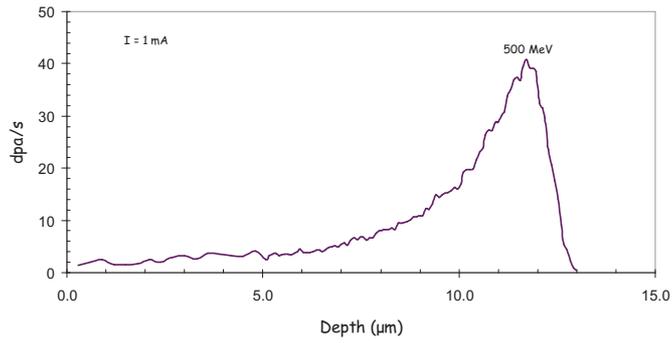


Figura I.8. dpa/s generados por PKAs en función de la distancia, en tungsteno (W), con $I = 1 \text{ mA}$, Densidad = $6.338\text{E}22 \text{ atomos/cm}^3 = 19.35 \text{ g/cm}^3$.

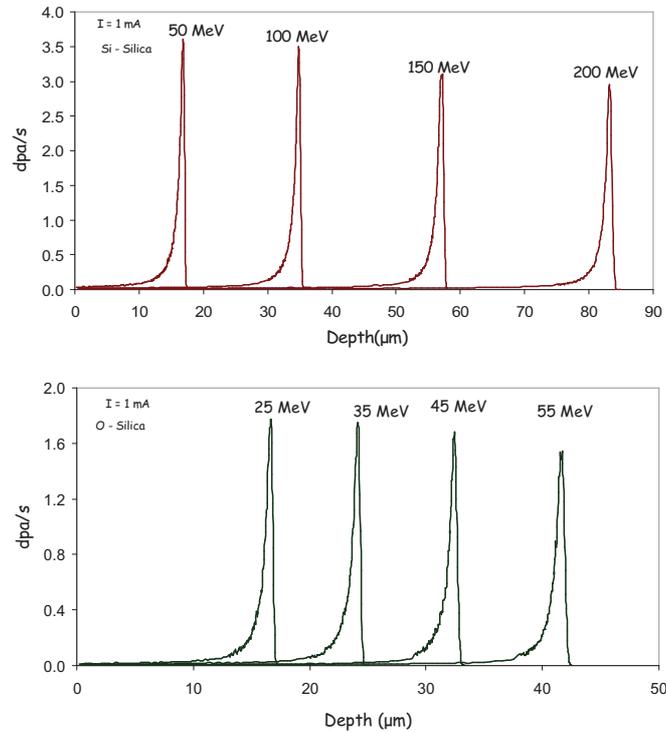


Figura I.9. dpa/s generados por los dos tipos de PKA en el SiO_2 . $I = 1 \text{ mA}$ Densidad = $6.614\text{E}+22 \text{ atomos/cm}^3 = 2.2 \text{ g/cm}^3$

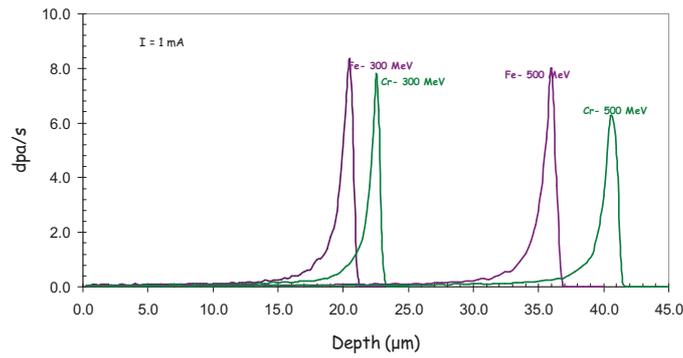


Figura I.10. dpa/s generados por PKA_s de Fe y Cr en EUROFER. I = 1 mA.

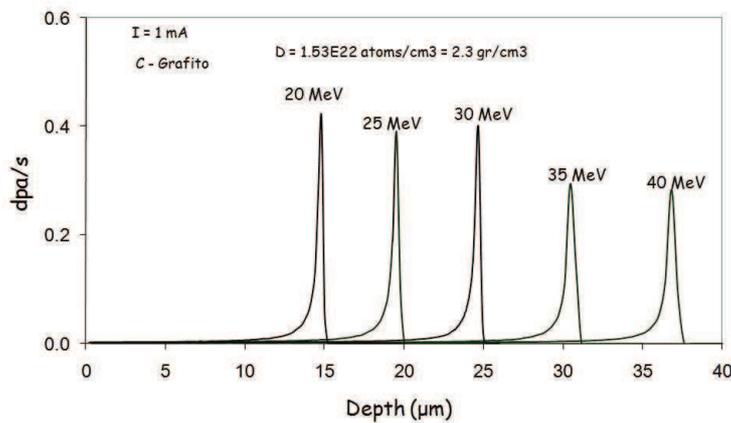


Figura I.11. dpa/s generados por los de PKA de C en Grafito, I = 1 mA. Densidad = 1.53 E22 atoms/cm³ = 2.3 gr/cm³.

Para simular una irradiación homogénea, se utiliza un método matemático basado en la suma de los picos de daño desplazándolos en la dirección de penetración del ión. Esto se hace así porque, como puede observarse en las gráficas anteriores, el perfil de generación de vacantes no varía en función de la energía en la mayoría de los casos sino que solo se desplaza en la dirección de penetración al aumentar la energía del ión. Por ello, se puede analizar que cantidad de picos se necesitan y que separación se debe introducir entre ellos. Esto dará tanto el factor por el que se debe multiplicar la intensidad para corregir la intensidad calculada para un sólo pico, como la cantidad de energía que se necesita utilizar para la irradiación continua. La Figura I.12 muestra el perfil obtenido sumando 42 picos de energía.

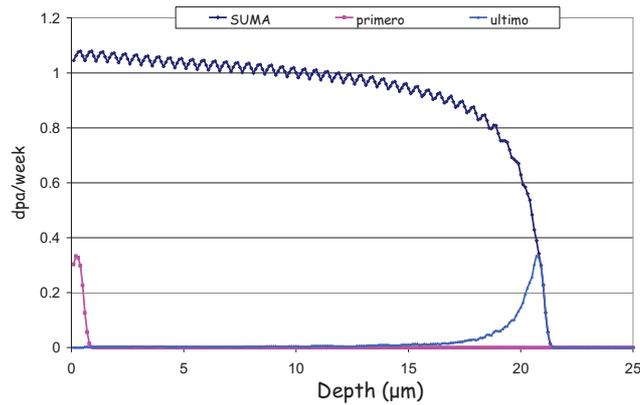


Figura I.12. Suma de picos de generación de daño provocado por iones de Fe sobre Fe expresado en dpa/semana. La energía de referencia utilizada es 300 MeV, es decir, es pico que se ha sumado en la dirección de penetración corresponde a los dpa_s generados por iones de Fe a 300 MeV. La energía de referencia da la distancia máxima de irradiación que se va a considerar.

(II) Implantación de iones ligeros

El He o el H implantados se evalúan con la magnitud appm, que simboliza Átomos por Millón, es decir, que 1 appm significa que hay un átomo de He o H por millón de átomos de la caja de simulación.

Se ha realizado un estudio del perfil de implantación de los iones ligeros en los materiales analizados con el fin de determinar tanto la energía necesaria para implantar a la misma profundidad que los iones pesados como los picos de energías y intensidad necesarios para realizar una implantación homogénea en penetración y que sea del orden de 1 a 100 appm a la semana (orden de magnitud de implantación en ambientes de fusión). En las Figuras desde I.13 a I.17 se muestra los iones de He implantados en los diferentes materiales en función de la distancia de penetración para diferentes energías de lanzamiento.

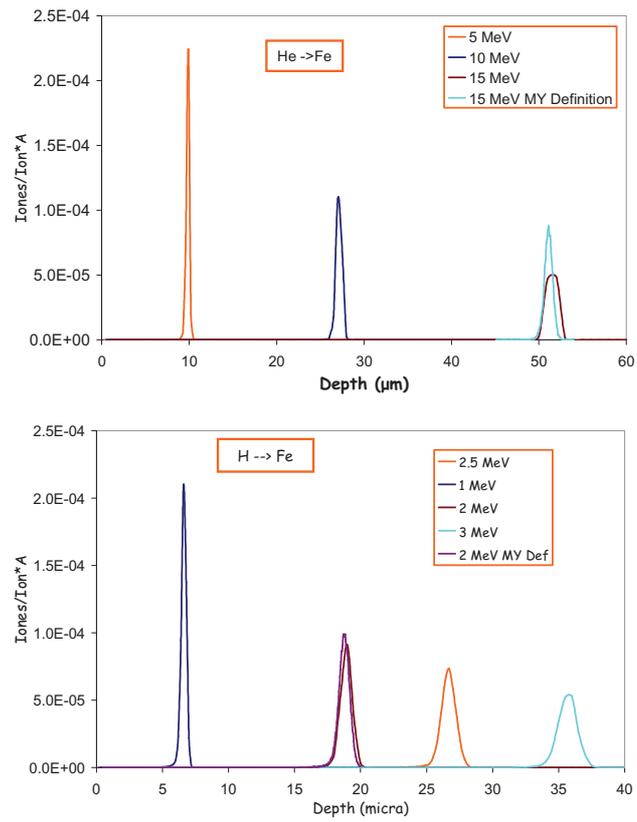


Figura I.13. Iones de He a) y H b) implantados en función de la profundidad en Fe para diferentes energías.

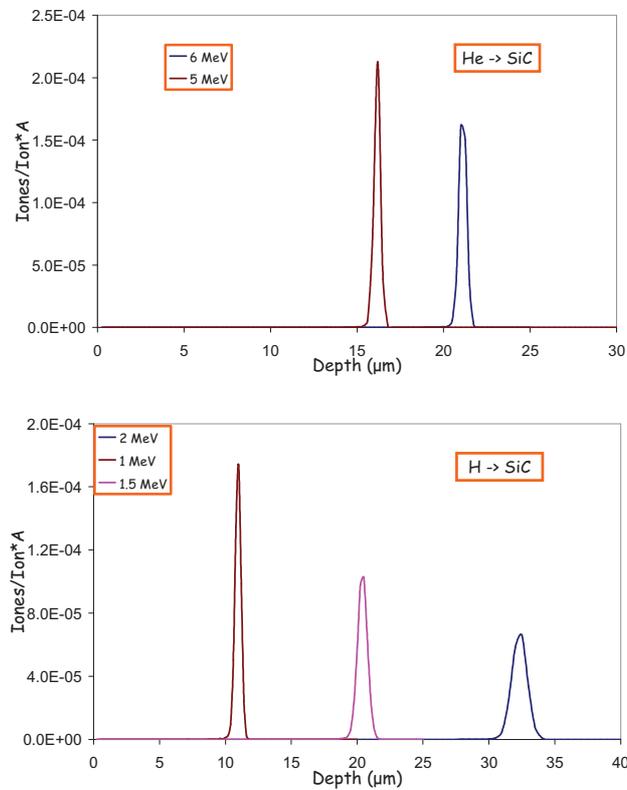


Figura I.14. Iones de He y H implantados en función de la profundidad en SiC para diferentes energías.

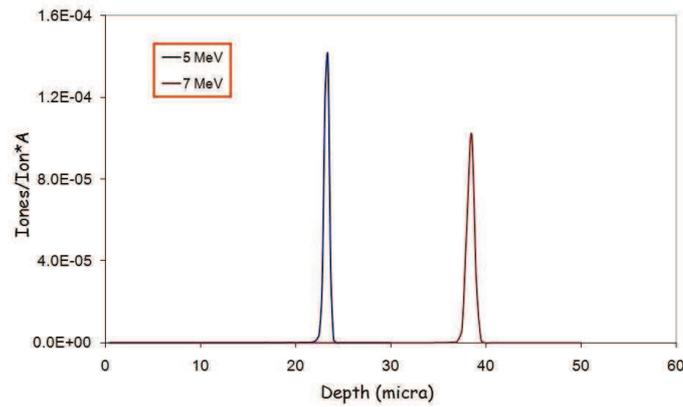


Figura I.15. Iones de He implantados en función de la profundidad en SiO_2 para diferentes energías.

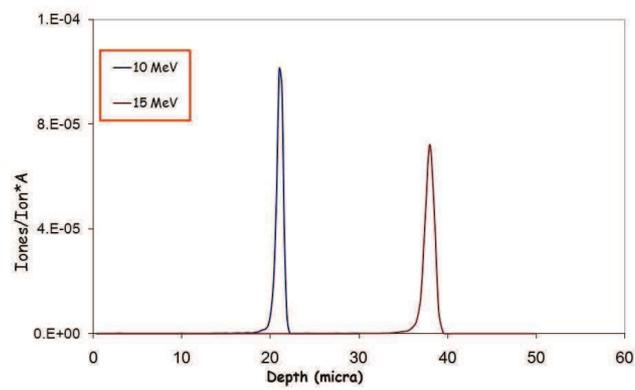


Figura I.16. Iones de He implantados en función de la profundidad en W para diferentes energías.

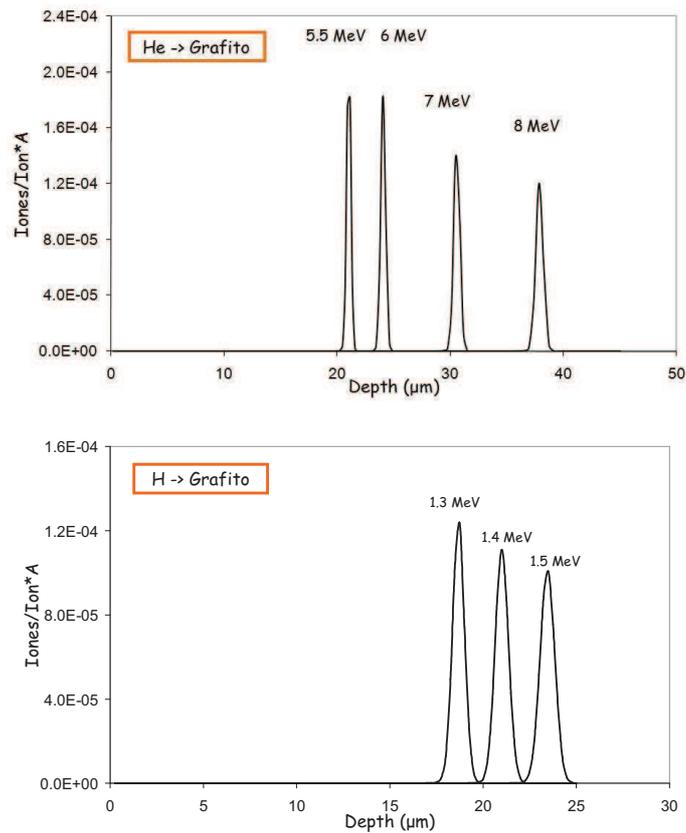


Figura I.17. Iones de He y H implantados en función de la profundidad en Grafito para diferentes energías.

En la Figura I.18 se expone una gráfica donde se muestra la metodología utilizada para seleccionar las energías de cada uno de los iones de la irradiación triple (ión, He e H) para que coincidan tanto las distancias máximas de generación de daño como las distancias de implantación de H y He.

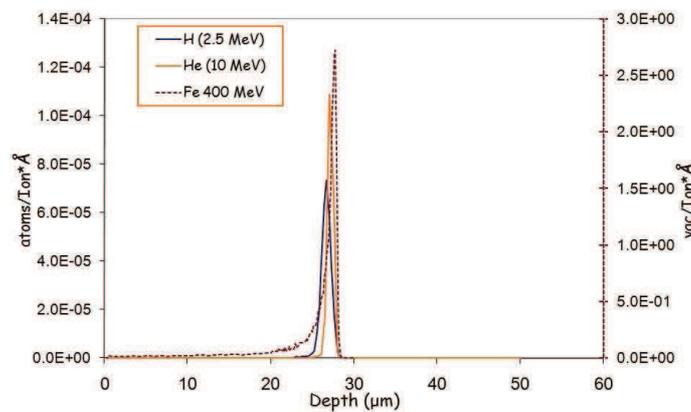


Figura I.18. Coincidencia en profundidad del daño generado y los iones ligeros implantados en Fe, en función de la energía del ion implantado.

Para calcular los appm/semana primero se obtiene del programa SRIM los appm/ión incidente. Para ello, de los datos obtenidos del fichero range.txt de atoms/Å/ión, los appm/ion se calculan los appm por ión incidente utilizando la ecuación 1.2:

$$\frac{appm}{Ion \text{ Incidente}} \cdot cm^2 = \frac{atomsHe}{cm \cdot Ion} \cdot \frac{1}{\rho[atoms/cm^3]} \cdot 1 \cdot 10^{-6} atoms \quad ec. 1.2$$

atomsHe/ Å*·*ión → es una medida que indica la porción de átomos de He que se queda en cada unidad de longitud de cada intervalo, por átomo de He incidente (ión). Siendo ρ la densidad del material. Este término viene multiplicado por un millón de átomos ya que todo lo anterior son los átomos de He depositados por unidad de ión incidente y átomo de la caja.

Una vez hecho lo anterior se calcula la intensidad necesaria para conseguir 1appm/semana en el máximo de la distribución. Para ello primero se calcula cuantos appm/s son 1 appm/semana mediante la expresión 1.3:

$$\frac{1appm}{semana} = 1.65344 \cdot 10^{-6} \frac{appm}{s} \quad ec. 1.3$$

A continuación, a través de la ecuación 1.4 se obtiene la intensidad necesaria para conseguir un appm/semana en el máximo de la distribución:

$$I \left[\frac{Iones}{s \cdot cm^2} \right] = \frac{1.65344 \cdot 10^{-6} \frac{appm}{s} \cdot \rho \left[\frac{atoms}{cm^3} \right]}{Max \text{ de Distrib} \left[\frac{atomsHe}{cm \cdot (Ion \text{ Incidente})} \right] \cdot 1 \cdot 10^6 atoms} \quad ec. 1.4$$

Multiplicando por el factor 1,6 E-19 de cada ión se obtiene la intensidad en c/s*cm².

Una vez calculada la intensidad para un pico se lleva a cabo la suma de varios picos para que la implantación sea uniforme y para que se mantenga en 1 appm/semana a lo largo de toda la penetración.

(III) Intensidades y comparativa con otras instalaciones

En las Tablas I.2, I.3, I.4, I.5 y I.6 se recogen las intensidades, calculadas con los métodos anteriormente mencionados, necesarias para generar ciertos dpas/semana y ciertos appms/semana para cada uno de los materiales estudiados para los iones estudiados.

Tabla I.2. Intensidades por cm^2 de los iones de Fe, H y He necesarias para producir un daño homogéneo en penetración y una implantación homogénea en profundidad de H y He appm a la semana en una muestra de Fe.

Fe	Fe (300 MeV) 20 μm	He (5 MeV hasta 10 MeV) 20 hasta 25 μm	H (2 MeV) 20 μm
Ion (0.1dpa/semana) He (1 appm/semana)	0.24 nA/cm ²	37.87 pA/cm ²	41.3 pA/cm ²
Ion (1 dpa/semana) He (100 appm/semana)	2.40 nA/cm ²	3.78 nA/cm ²	4.13 nA/cm ²

Tabla I.3. Intensidades por cm^2 de los iones de Si, C y He necesarias para producir un daño homogéneo en penetración y una implantación homogénea en profundidad de H y He appm a la semana en una muestra de SiC.

SiC	Si (100 eV) 25 μm	C (25 MeV hasta 30 MeV) 25 μm	He (6 MeV) 25 μm
Ion (0.1dpa/semana) He (1appm/semana)	1.68 nA/cm ²	4.45 nA/cm ²	56.47 pA/cm ²
Ion (1 dpa/semana) He (100 appm/semana)	16.89 nA/cm ²	44.51 nA/cm ²	5.64 nA/cm ²

Tabla I.4. Intensidades por cm^2 de los iones de Si, O y He necesarias para producir un daño homogéneo en penetración y una implantación homogénea en profundidad de H y He appm a la semana en una muestra de SiO₂

SiO ₂	Si (100 MeV) 25 hasta 30 μm	O (35 MeV) 25 hasta 30 μm	He (5 MeV) 25 hasta 30 μm
Ion (0.1dpa/semana) He (1appm/semana)	1.08 nA/cm ²	2.16 nA/cm ²	42.72 pA/cm ²
Ion (1 dpa/semana) He (100 appm/semana)	10.81 nA/cm ²	21.68 nA/cm ²	4.27 nA/cm ²

Tabla I.5. Intensidades por cm^2 de los iones de W y He necesarias para producir un daño homogéneo en penetración y una implantación homogénea en profundidad de H y He appm a la semana en una muestra de W.

W	W (500 MeV) 13 μm	He (10 MeV) 20 μm
Ion (0.1 dpa/semana) He (1 appm/semana)	28.36 pA/cm ²	55.69 pA/cm ²
Ion (1 dpa/semana) He (100 appm/semana)	0.28 nA/cm ²	5.56 nA/cm ²

Tabla I.6. Intensidades por cm^2 de los iones de C, H y He necesarias para producir un daño homogéneo en penetración y una implantación homogénea en profundidad de H y He appm a la semana en una muestra de Grafito.

Grafito	C (26 MeV) 20 μm	He (5.5 MeV) 20 μm	H (1.4 MeV) 20 μm
Ion (0.1 dpa/semana) He (1 appm/semana)	11.64 nA/cm ²	65.7 pA/cm ²	68.7 pA/cm ²
Ion (1 dpa/semana) He (100 appm/semana)	0.11 $\mu\text{A/cm}^2$	6.57 nA/cm ²	6.87 nA/cm ²

Los valores obtenidos son de gran importancia ya que determinan los niveles de corriente a exigir a los dos aceleradores de iones ligeros y al de iones pesados.

En la Figura I.19 se muestra una comparativa de los dpa_s y appm_s de He producidos en una semana de irradiación en diferentes instalaciones de fisión, fusión y aceleradores de partículas. De las magnitudes obtenidas se observa que los niveles de implantación son realmente muy bajos y, por tanto, no ofrecen problemas de requisitos para fuentes de iones de corrientes elevadas. El verdadero problema reside en controlar unos valores de corrientes tan reducidos. No obstante, al introducir un degradador de energía se reduce la corriente neta que llega a la muestra, por lo que este valor deberá aumentar en un cierto grado.

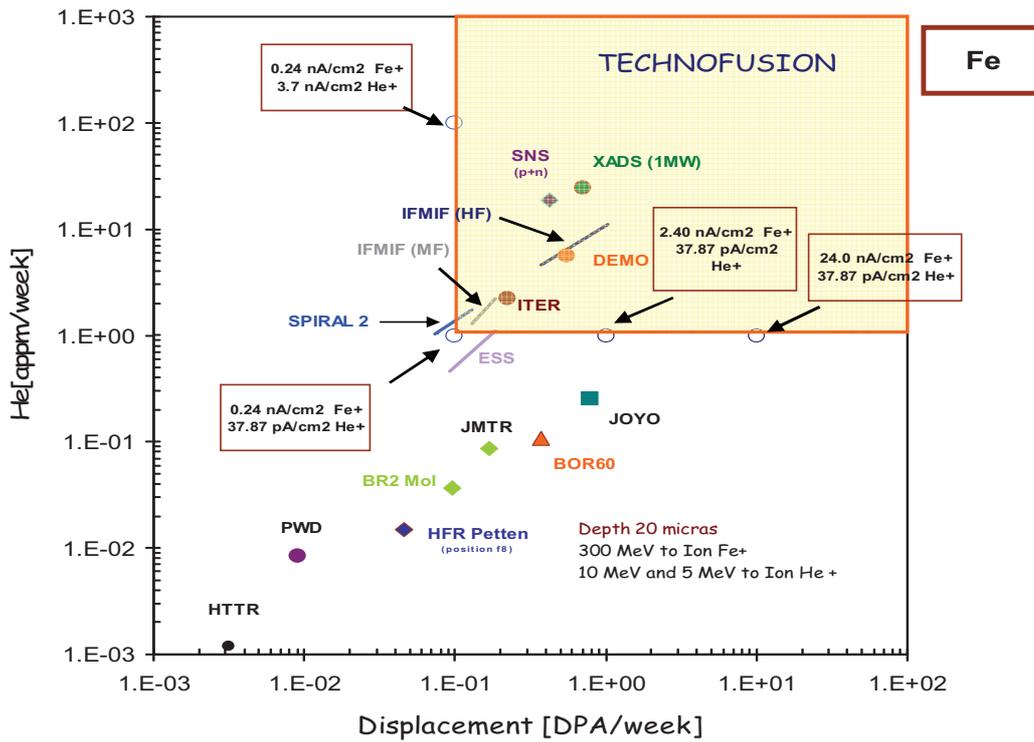


Figura I.19. Comparativa de diferentes instalaciones (aceleradores de partículas, instalaciones de fisión, y futuras instalaciones de fusión) de los appm/semana de He respecto a los desplazamientos expresados en dpa/semana para una irradiación homogénea en profundidad de iones Fe sobre Fe e iones He sobre Fe (para diferentes intensidades y para una energía máxima de irradiación de 300 MeV (Fe) y 10 MeV (He)).

(IV) Irradiación lineal de He en Fe

En este apartado se lleva a cabo la validación del método empleado para el cálculo de las intensidades anteriormente calculadas. Se intenta comprobar que la suma de picos en la dirección de penetración sirve como método de cálculo de intensidades de un haz con una degradación de la energía para conseguir una irradiación homogénea. Para ello se realiza una irradiación variando el punto de salida del ión incidente a lo largo del eje y. Se seleccionan 100 puntos equiespaciados en el eje y de $-2.5 \mu\text{m}$ a $2.5 \mu\text{m}$ (Figura I.20) Además se varía la energía del ión de 0 a 8 MeV. Para hacer lo anterior el espacio se divide en intervalos y se calcula la energía para cada profundidad utilizando un polinomio de ajuste sobre el estudio de rangos de penetración del He sobre el Fe (Figura I.21). Como condición fundamental para seleccionar el número de energías escogidos se impone que la implantación fuese lo más homogénea posible (Figura I.22, Figura I.23). Todo lo anterior proporcionará información sobre la distribución de los átomos de He al lanzarse en una distribución lineal contra una muestra de Fe. Debido a que en todas direcciones el material se comportará de la misma manera, la extrapolación a un perfil de irradiación de superficie es inmediata.

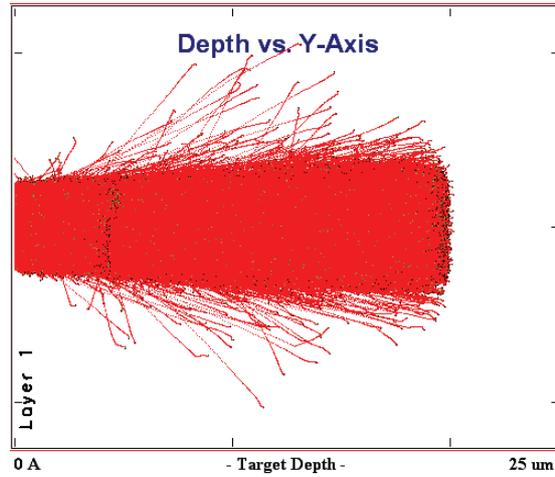


Figura I.20. Implantación de He sobre Fe. Iones He lanzados en posiciones variables de -2.5 μm a 2.5 μm con energía variable de 0 a 8 MeV siguiendo la distribución de energía de la Figura I.21.

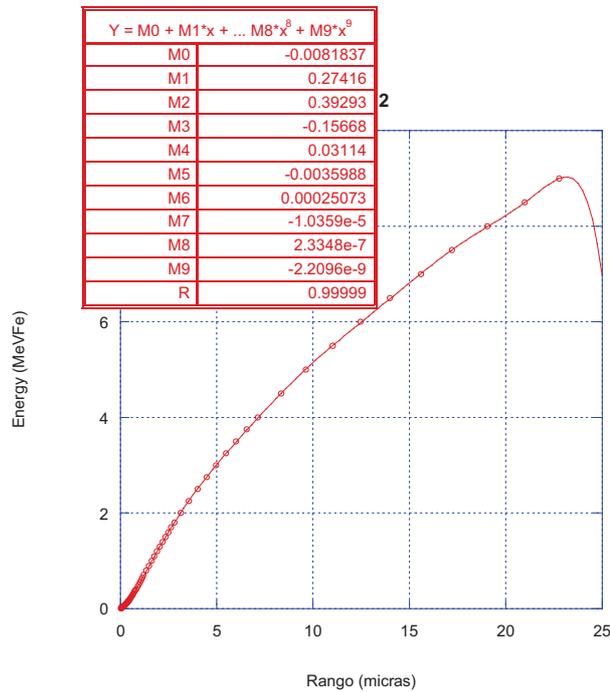


Figura I.21. Ajuste con un polinomio de orden 9 del rango de penetración de He en Fe, hasta una energía de 8 MeV.

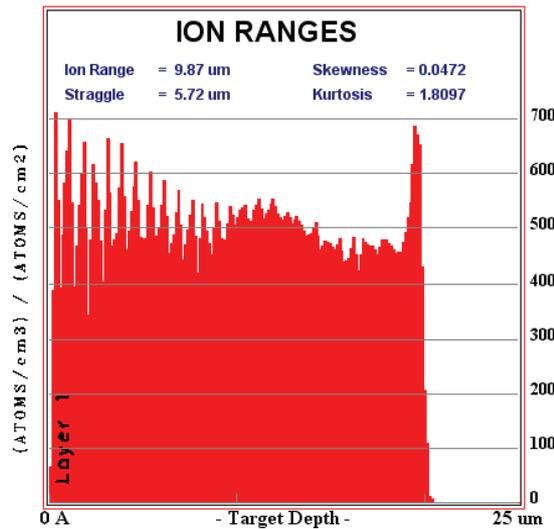


Figura I.22. Implantación de átomos de He sobre Fe con energías comprendidas entre 0 y 8 MeV.

A continuación se calcula la intensidad necesaria para obtener 1 appm/semana de He repartido homogéneamente en profundidad y en superficie, es decir, en todo el volumen de Fe irradiado. Para ello se calcula un histograma en el que se divide el eje en 100 partes para posteriormente sumar todas las partículas en la dirección de penetración, como puede observarse en la Figura I.24. Se selecciona la media de partículas en la parte central del histograma, es decir, entre -2 y 2 μm, siendo este valor 1.952 partículas. A continuación se elige este valor y se divide por el volumen en el que se encuentra esta cantidad de partículas 20 μm (profundidad) x 0.1 μm (eje y) x 0.1 μm (eje y). Se supone un valor de 0.1 μm en la dirección z al asumir que en los ejes z e y ocurrirá lo mismo, aunque más adelante se constatará que en realidad está afectado por una corrección, ya que al lanzar las partículas en un plano y no en una línea, por la dispersión, el número de partículas en el centro del plano es mayor. Esto provocará que se necesite una menor intensidad de la calculada con este método (la explicación completa se mostrará más adelante). Por este método se obtiene que:

$$\frac{\text{Número de iones}}{\text{Volumen}} = \frac{1952 \text{ iones}}{0.002 \times 0.00001 \times 0.00001 \text{ cm}^3} = 9.76 \cdot 10^{15} \text{ iones He} / \text{cm}^3$$

ec.I.5

Dividiendo por la densidad del Fe:

$$\frac{\text{iones}}{\text{atomos}} = \frac{9.76 \cdot 10^{15} \text{ iones} / \text{cm}^3}{8.48 \cdot 10^{22} \text{ atomos} / \text{cm}^3} = 1.15 \cdot 10^{-7} \text{ iones} / \text{átomos}$$

ec.I.6

Multiplicando por un millón de átomos se obtienen los appm en ese volumen:

Concentración de iones de He = 0.115 appm.

De esta manera se obtienen los appm_s que se generan en el centro de la distribución con los 97.952 iones lanzados en la simulación de SRIM.

Si este número de iones lanzados se divide entre 100 (partes en la que se ha dividido el eje y para lanzar los iones) se obtiene el número de iones por cada cuadrado del histograma. No obstante, para emular un perfil de haz cuadrado, habrán de tenerse 100 x 100 puntos de lanzamiento, es decir, 10.000 puntos de lanzamiento, por lo que en total se habrán lanzado: (979.52 iones/puntos) x 10.000 puntos = 9.795.200 iones para conseguir 0.115 appm en un volumen de 20 x 0.1 x 0.1 μm³.

Si este número se divide por el número de appm, se obtienen los iones que se requieren para conseguir 1 appm en una semana y en ese volumen:

$$\frac{9795200 \text{ iones}}{0.115 \text{ appm}} = 85071842.19 \text{ iones/para1appm} \quad \text{ec. 1.7}$$

Multiplicando por la carga de cada ión, se obtiene la carga total mediante la ecuación 1.8:

$$Q=1.36E-11 \text{ c} \quad \text{ec.1.8}$$

Dividiendo por la superficie del perfil del haz, en este caso de 5x5 μm², y por los segundos de una semana, se obtiene la intensidad por cm² que se necesita:

$$I \left[\frac{\text{c}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right] = \frac{1.36 \cdot 10^{-11} \text{ c}}{(0.0005 \cdot 0.0005 \mu\text{m}^2) \cdot (3600 \cdot 24 \cdot 7 \text{seg})} = 9.01 \cdot 10^{-11} \frac{\text{c}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

ec. 1.9

Esta intensidad es aproximadamente el doble de la intensidad calculada cuando se utiliza un único punto de irradiación. Esto es lógico, ya que se produce una cierta dispersión. Lo que interesa es la concentración de átomos de He que se producen en el centro de la distribución-paralelepípedo dentro de la zona amarilla de la gráfica de la Figura 1.24.

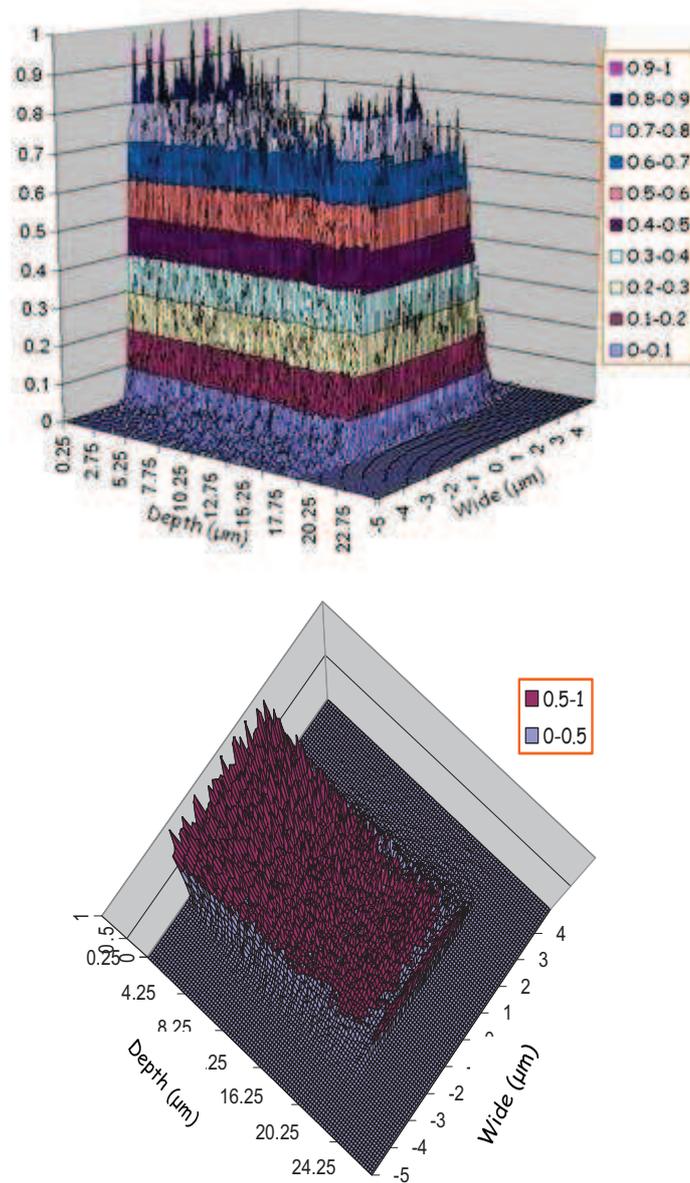


Figura I.23. Histograma de la distribución de iones de He incidiendo en Fe con energías variables entre 0 y 8 MeV equidistantes en el espacio. (Arriba) vista lateral, (abajo) vista aérea.

Si se lleva a cabo este mismo cálculo pero realizando un perfil de haz cuadrado (*footprint*) para una sola energía (debido a la cantidad de iones que hay que lanzar en este tipo de perfil en el SRIM) se obtiene una intensidad de 20 pA/cm². Este valor es algo menor al anterior debido a la dispersión de los iones, y se tiene una mayor concentración de iones en la parte central de la irradiación, por lo que se requiere menos intensidad para producir un appm/semana.

Lo importante a destacar es que en todos los cálculos se está en el mismo orden de magnitud, por lo que puede decirse que el método matemático utilizado para el cálculo de las intensidades es correcto.

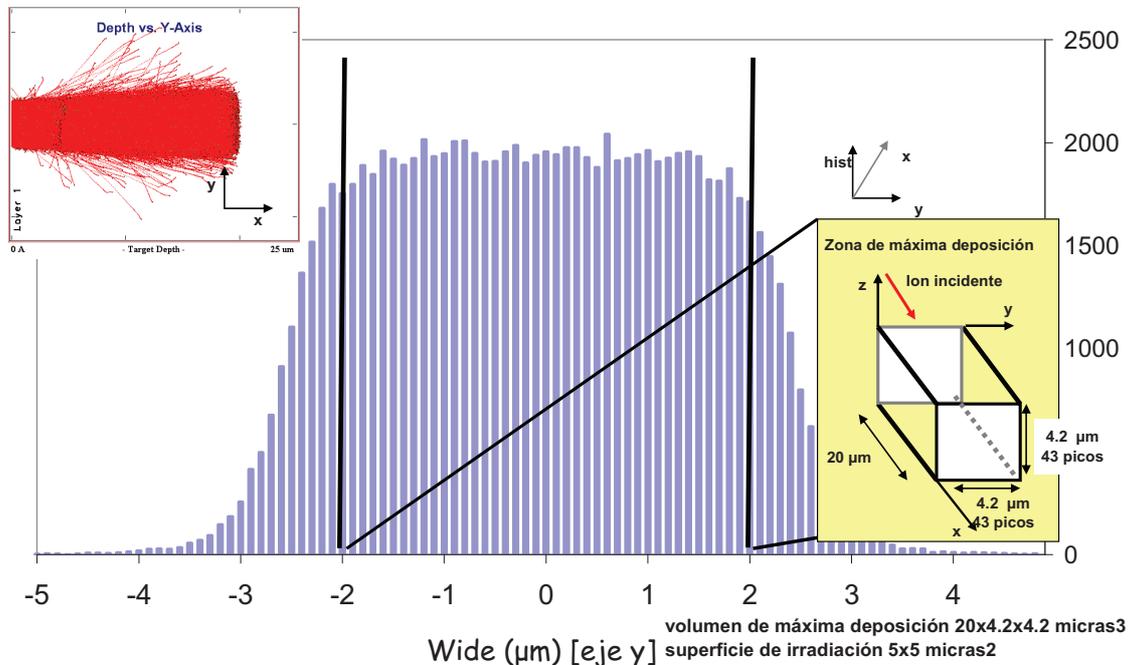


Figura I.24. Histogramas de la distribución de iones (He+ sobre Fe) en función del ancho del haz y sumando para todo el intervalo de penetración. Ancho inicial del haz de 10 µm

(V) Espectros de PKA_s

Uno de los aspectos más importantes a la hora de comparar la radiación neutrónica con la irradiación triple de iones (en términos de daño por irradiación en los materiales) es que los espectros de PKA_s sean similares. Para comprobar esto se ha realizado un análisis del espectro de PKA integrado (Figura I.25a). El espectro de PKA utilizado no es más que la energía que el ión incidente deposita en el material menos la energía perdida por ionización, calculado con el código SRIM asociado a la irradiación de iones sobre materiales y para diferentes energías de lanzamiento y comparado con el espectro de PKA esperado para IFMIF y DEMO calculado con el código SPECTER. Los espectros de neutrones de IFMIF utilizados para este cálculo se han calculado con el código McDeLicious, basado en el cálculo de Monte Carlo para el transporte neutrónico (una evolución del código MCNP5)¹⁶⁸.

¹⁶⁸ P. Pereslavitsev et al., J.Nucl.Mat. 367-370 (2007) 1531.

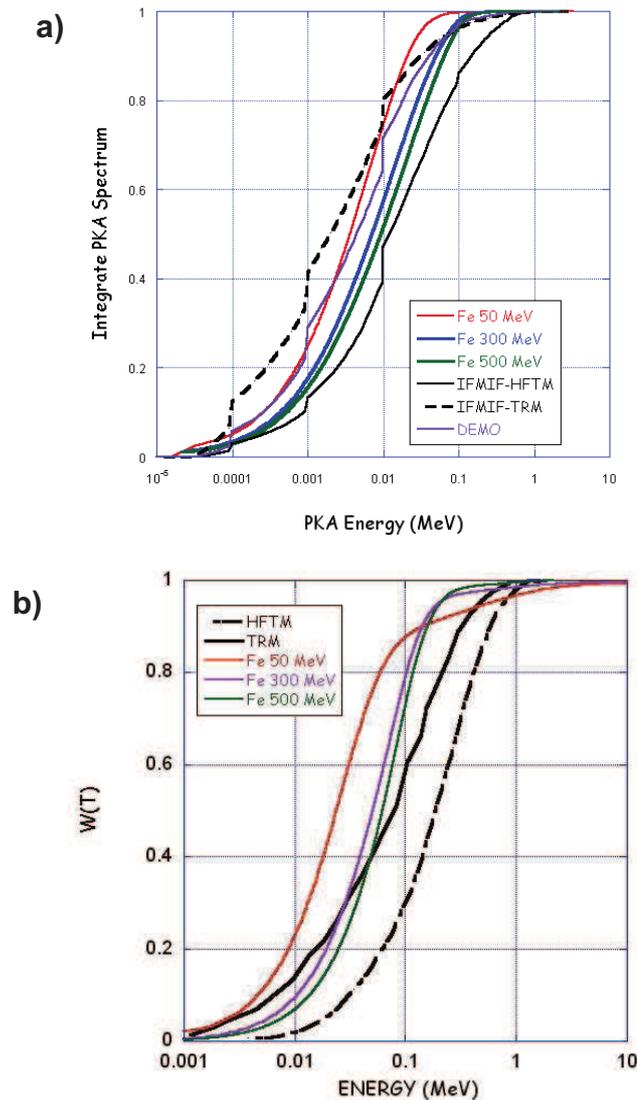


Figura I.25. (a) Comparación del espectro integrado de PKA de iones Fe, incidiendo sobre Fe, con una energía de lanzamiento de 50, 300 y 500 MeV (código SRIM), comparado con los espectros de PKA para las instalaciones de IFMIF y DEMO (código SPECTER). (b) Comparación de la Función de daño de los iones Fe con energías de lanzamiento de 50, 300 y 500 MeV (código SRIM), comparado la función de daño los espectros neutrónicos de IFMIF en material de Fe.

Como se comentó anteriormente, los espectros de PKA de la irradiación de los iones de Fe se han obtenido de cálculos realizados con el código SRIM, código que para cálculos de magnitudes macroscópicas de daño (perfiles de vacantes e intersticiales, perfiles de ionización, perfiles de energía depositada, rangos de penetración, etc.) es bastante preciso, pero que lo es menos para cálculos del daño específico depositado en cada colisión. De hecho, si se analiza el balance energético de cada colisión que se obtiene en el fichero Collision.txt, se observa que la pérdida de energía del ión entre cada colisión menos la pérdida por ionización no da como resultado lo que denomina el fichero como “energía de PKA” ya que la cantidad de

energía perdida por ionización está sujeta a variaciones aleatorias debidas al *Stragglings*¹⁶⁹.

Una primera conclusión es la de que para acercarse lo más posible al espectro de PKA de fusión se debe usar el rango más alto de energías de iones de Fe, ya que la forma de los espectros en la zona de los PKA de mayor energía es más parecida.

Este espectro de PKA generará daño por colisiones en el material, así que hay una función más característica del efecto por radiación en los materiales denominada "función de daño". Ésta no es más que el espectro de PKA sopesado con una función del número de defectos generados para cada energía de PKA. La función de daño se puede calcular de varias formas: la más simple es utilizando la ecuación de partición de Robinson, claro está, sabiendo la energía de desplazamiento depositada por el ión, dato que se puede obtener a través del código SRIM. Esto proporcionará la función del número de defectos en función de la energía del PKA y de ahí se puede obtener la función de daño mediante una integración. Existe una manera más precisa para realizar el cálculo de la función de daño que es utilizar el código Marlowe, basado en colisiones binarias y que utiliza el modelo BCA para el estudio de las colisiones.

Para los cálculos que a continuación se exponen se ha utilizado el código Marlowe. Se ha obtenido el perfil de daño, que es el número de pares de Frenkel generados en función de la energía del PKA (Figura I.26). Una vez obtenido el perfil de daño se integra con el espectro de PKA para obtener la función de daño. En la Figura I.25b se representa la función de daño integrada de los espectros de PKA para iones de Fe de 50 MeV, 300 MeV y 500 MeV, superpuesta sobre la función de daño calculada para IFMIF. Como puede observarse, se debe llegar a energías de 300 MeV para llegar al rango de generación de daño de IFMIF.

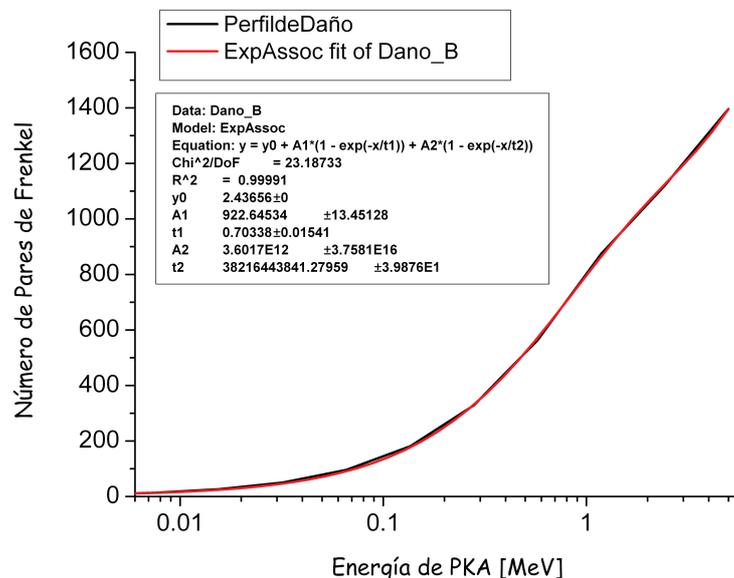


Figura I.26. Perfil de daño de iones de PKAs de Fe en Fe. La línea negra corresponde a los cálculos realizados por Marlowe y la línea roja es el ajuste mediante un polinomio exponencial de la curva.

¹⁶⁹ J.F.Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler, „ The Stopping and Range of Ions in Matter“ Book, ISBN -13: 978-0-9654207-1-6.

I.1.3. Comparativa de daño producido por protones de 40 y 70 MeV

Como se comentó en la introducción, existe otra manera alternativa de simular el daño generado por los neutrones en un futuro reactor de fusión nuclear. Esta alternativa se basa en irradiar las muestras con protones de alta energía, protones a partir de 40 MeV para simular el efecto de la radiación de neutrones de 16 MeV. Se utilizan protones de mayor energía que los neutrones ya que al estar los protones cargados, se necesita una mayor energía para desprejar el efecto de la interacción electromagnética. En este apartado se va a estudiar el tipo de daño y producción de gases generados por este tipo de radiación, las intensidades necesarias para producir el daño y los gases comparables con los producidos en instalaciones de fusión. Aunque los efectos de las radiaciones de neutrones y de fotones generadas por los protones al colisionar con el material serán estudiados en secciones siguientes, se introducen en este apartado para una mejor comprensión del mismo.

Esta técnica tiene ciertas ventajas y ciertos inconvenientes:

Ventajas:

- Se necesita una única irradiación, es decir, un solo acelerador para realizar el experimento ya que se genera H y He directamente.
- Al contrario que en la irradiación de iones pesados, se pueden alcanzar espesores de irradiación del orden del milímetro.
- Para conseguir una irradiación homogénea en penetración no es necesario la introducción de un degradador de energía, como ocurría en el caso de los iones pesados.
- Los gases ligeros (H y He) se crean directamente por transmutación por lo que el efecto de los mismos es idéntico al creado cuando se generan por neutrones (es decir, se evita el efecto *track* que se genera cuando se implantan desde fuera de la muestra)

Inconvenientes:

- Se producen una cierta cantidad de impurezas no deseadas en la muestra debido a las altas energías de los protones y la baja masa de esta partícula, que favorece el aumento de reacciones inelásticas (neutrones, *gammas* e impurezas activas y no activas). Este punto debe ser evaluado y tenido en cuenta.
- El nivel de He producido es algo mayor que el esperado con neutrones. Factor éste de mayor impacto.

En la Figura I.27 se muestran los diferentes rangos de penetración de los protones para distintos materiales. Se aprecia fácilmente que con protones de 40 MeV se alcanzan penetraciones de 2.5 mm para el Fe, 1.5 mm para el W, 5.5 mm para el SiC, 8.1 mm para el SiO₂ y 9.8 mm para el Be.

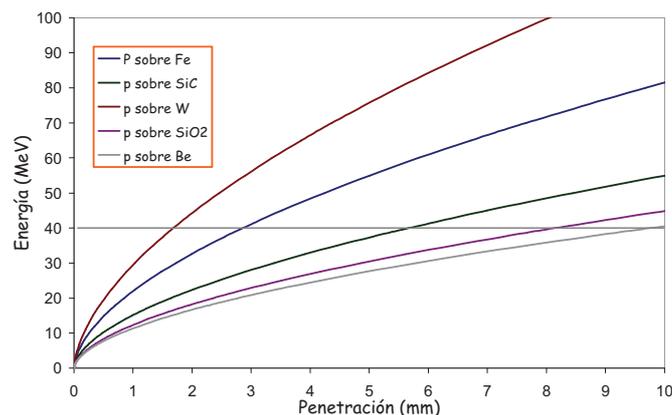


Figura I.27. Rangos de penetración de protones en diferentes materiales.

No obstante, hay que tener en cuenta que no se pueden utilizar muestras con esos espesores ya que para que el daño sea parecido al neutrónico los protones deben atravesar la muestra y no dispersarse demasiado para que el daño sea homogéneo en profundidad.

A continuación se analiza para el Fe cual es el espesor máximo permitido para este experimento con protones de 40 MeV y 70 MeV.

(I) Análisis del daño generado

Con este tipo de radiación, al contrario de cómo ocurría en la irradiación con iones pesados, no es necesaria la utilización de un degradador de energía para generar un daño homogéneo en el material. Esto implica que el daño será prácticamente constante en todo el espesor del material, siempre que no exceda más de algunos milímetros de espesor, dependiendo del material irradiado (Figura I.28).

En la Figura I.28 se observa claramente como la generación homogénea de daño, para el caso de 40 MeV, sólo puede asegurarse para un espesor de 1 mm. A partir del milímetro se produce una mayor dispersión de los protones. Hay que tener en cuenta que el rango de penetración de los protones en Fe es de aproximadamente 2.5 mm. Para el caso de 70 MeV, se puede asumir una implantación homogénea con un espesor máximo de 2 mm. En la Figura I.29 se muestra la energía depositada por ionización por unidad de distancia y tiempo para protones de 40 MeV con una intensidad de corriente de $79 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y para protones de 70 MeV con una intensidad de corriente de $152 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

En la Tabla I.7 se recogen las intensidades necesarias para generar 0.1 dpa/semana y 1 dpa/semana para ambas energías de los protones. Estos valores de corriente son notablemente superiores a los obtenidos para implantación, ya que ahora el H y He se producen sólo por reacciones nucleares $p \rightarrow \text{Fe}$.

Para evaluar la capacidad de estas irradiaciones para simular el efecto neutrónico, se debe calcular el cociente de dpa_s generados y He creado por unidad de

tiempo. En la Tabla I.8 se presentan los valores obtenidos con estos protones comparados con el valor típico para fusión. Según este criterio los protones de 40 MeV son mucho mas adecuados que los de 70 MeV. Este es un factor decisivo a la hora de decidir usar finalmente protones de 40 MeV frente a los de 70 MeV.

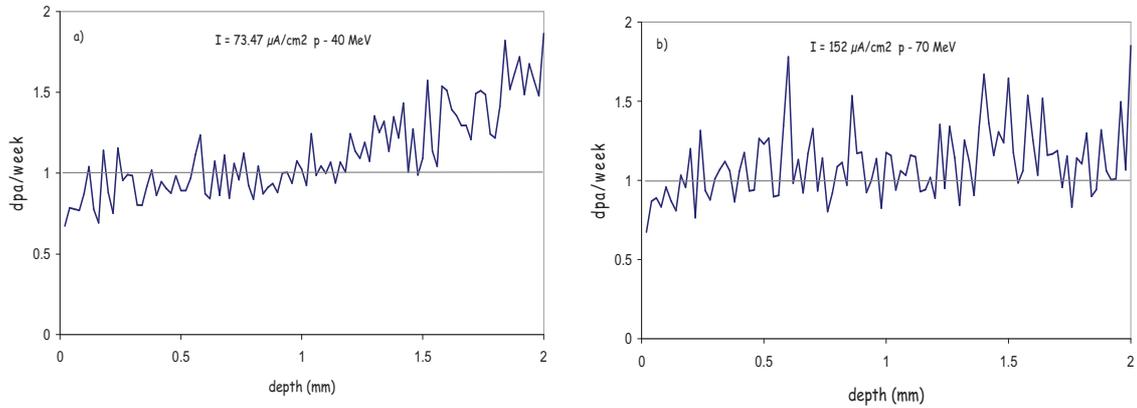


Figura I.28. (Izquierda) dpa/semana generados en una muestra de 2 mm de espesor de Fe por protones de 40 MeV de energía cinética y con una intensidad de 80 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. (Derecha) dpa/semana generados en una muestra de 2 mm de espesor de Fe por protones de 70 MeV de energía cinética y con una intensidad de 152 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

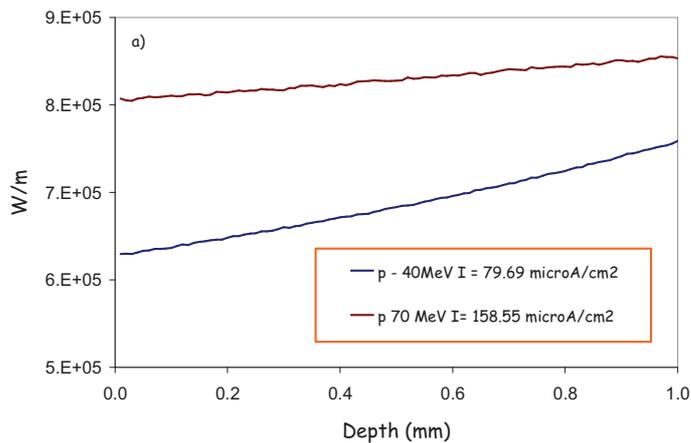


Figura I.29. Energía depositada por protones por ionización en una muestra de Fe de 1 mm de espesor. Energía cinética del protón de 40 MeV con una intensidad de 79 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y de 70 MeV con $I=159 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

Tabla I.7. Intensidades necesarias para obtener 0.1 ó 1 dpa/semana y 0.1 ó 1 appm de Helio irradiando con protones de 40 y 70 MeV

	Energía (dpa/semana)	
	40 MeV	70 MeV
0.1 dpa/semana	7.96 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	15.85 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
He 0.1appm/semana	0.24 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
1 dpa/semana	79.69 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	158.55 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
He 1appm/semana	2.42 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	2.26 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Tabla I.8. Cocientes de Helio/dpa obtenidos en fusión y con protones de 40 y 70 MeV.

	He/dpa
Fusión	11
40 MeV	33
70 MeV	70

El dato de la producción de He en la muestra de Fe por los protones de alta energía se ha calculado en base a los datos publicados de la sección eficaz de producción de He, mostrados en la Figura I.30¹⁷⁰.

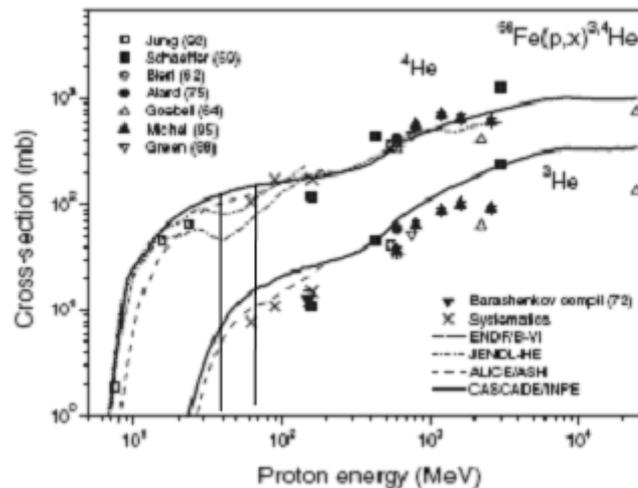


Figura I.30. Sección eficaz de producción de ³He y ⁴He para Fe irradiado por protones.

¹⁷⁰ Cornelis H.M. Broeders, Alexander Yu. Konobeyev, "Helium Production in Solid target and metallic windows materials irradiated with intermediate and high energy protons" Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 42, No. 10, p. 897-902 (October 2005).

(II) Función de daño y espectros de PKA de protones

Otro dato de gran importancia es la comparación del espectro de PKA producido por los protones en la red de Fe con el esperado en el reactor de fusión. En la Figura I.31 se muestra el espectro de PKA integrado de los protones de 40 y 70 MeV (calculados con el código SRIM) cuando inciden sobre una muestra de 1 mm de espesor de Fe comparado con el espectro de PKA esperado para IFMIF (obtenidos de cálculos realizados en el *Forschungszentrum Karlsruhe* (FZK)). En la Figura I.31a se representan los espectros de PKA integrado pero no normalizado, para que se pueda ver fácilmente que los protones de 40 MeV generan más daño que los de 70 MeV al atravesar una muestra de 1mm de espesor de Fe (un factor 2 aproximadamente). Esto es debido a que la mayor parte de la energía perdida en el frenado se produce por ionización a estas energías altas por lo que cuanto mayor es la energía menos eficiente es la pérdida de energía por colisiones, siempre y cuando la muestra sea lo suficientemente fina como para que los protones la atraviesen para ambas energías.

En la Figura I.31b se representan la función de daño integrada y normalizada para los protones de 40 MeV y 70 MeV comparados con el de la futura instalación IFMIF. Al contrario del anterior espectro de PKA de iones de Fe con diferentes energías mostrado en la Figura I.25 en el que la mayor parte de las colisiones eran elásticas, en las colisiones de los protones con los átomos de Fe no se puede concluir lo mismo. De hecho, nada más lejos de la realidad debido a la diferencia de masas existente entre el proyectil y el blanco se producirán multitud de reacciones inelásticas. Se debe puntualizar que el espectro de PKA para los protones de 40 y 70 MeV mostrado en este informe es meramente orientativo, ya que el código SRIM no es el más indicado para calcularlo, ya que sólo contempla colisiones elásticas entre proyectil y blanco. En este sentido, se está trabajando en su cálculo con el código SPECTER, el mismo código con el que se ha calculado los espectros de PKA para IFMIF y DEMO y que se basa en la utilización de datos nucleares de secciones eficaces para el cálculo de los espectros de PKA, dpa_s y producción de gases. Este código utiliza además datos de colisiones nucleares inelásticas que dan lugar a desplazamientos de los átomos del blanco, como (n, xn) , (n, α) , $(n, 2n\alpha)$, $(n, n'p)$, (n, H) , (n, γ) . El código SPECTER está adaptado para el cálculo de espectros de neutrones incidentes ya que las librerías de datos nucleares que utiliza son de neutrones, por lo que en estos momentos se está llevando a cabo una búsqueda de datos nucleares de reacciones nucleares que generen desplazamientos con protones incidentes, para poder acoplarlas al este código y de este modo poder calcular los espectros de PKA con mayor exactitud.

Teniendo en cuenta las limitaciones actuales del cálculo, si se analizan los resultados actuales se pueden ver ciertas discrepancias con los espectros de las instalaciones de fusión. No obstante, también debe tenerse en cuenta que se ha realizado el cálculo con protones monoenergéticos (40 o 70 MeV) y en un medio ópticamente delgado, es decir, que los protones lo atraviesan perdiendo un porcentaje muy pequeño de su energía inicial (método utilizado para que el daño sea homogéneo en toda su recorrido). Esto provoca que el espectro de PKA esté muy influenciado por los PKA_s de mayor energía, por lo que la curva obtenida tiene una pendiente casi vertical.

A continuación se calculó la función de daño de la misma manera que la explicada en secciones anteriores para los iones de Fe, utilizando el código Marlowe. Si se compara la función de daño de los protones de 40 y 70 MeV con la de IFMIF se

puede concluir que ambos están dentro del área de operación de IFMIF. Sin embargo, y como se verá en las secciones siguiente habrá que tenerse en cuenta que con los protones de 70 MeV existirá un problema de activación del material.

La conclusión es que utilizando protones de 40 MeV y 70 MeV obtenemos rangos de producción de daño similares a los esperados en IFMIF. No obstante y para estar completamente seguros de esta conclusión, en informes futuros habrá que calcular los espectros de PKA de los protones considerando reacciones nucleares inelásticas.

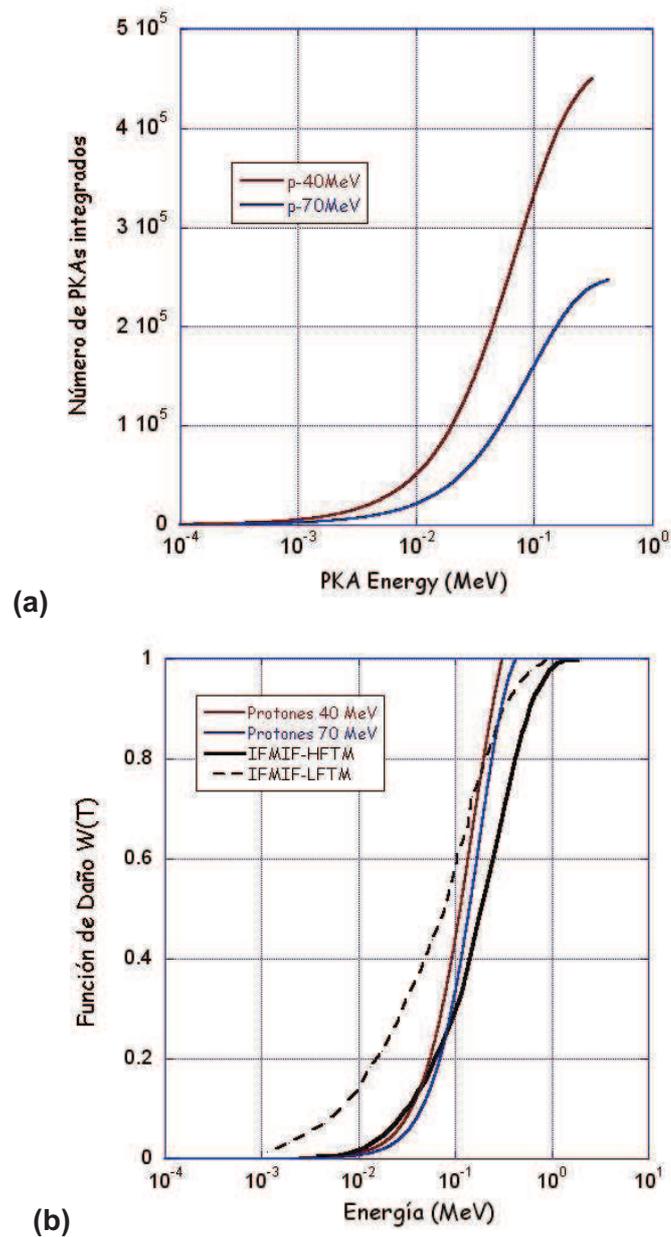


Figura I.31. (a) Espectro de PKA para una muestra de Fe de 1 mm de espesor irradiado por protones de 40 y 70 MeV (código SRIM) (b) Función de daño normalizada para los protones de 40 MeV y 70 MeV, comparados con los función de daño normalizada esperada para IFMIF (módulos HFTM y TRM).

(III) Espectros Neutrónicos y Gammas producidos.

El inconveniente principal que existe con este tipo de irradiación es que los protones de 40 y 70 MeV van a producir partículas e impurezas no deseadas y/o incómodas de tratar: neutrones, fotones e impurezas. En las gráficas que ha continuación se expondrán se mostrará la producción de estas partículas para ambas energía de protones. Podrá observarse como para los protones de 70 MeV se generan muchas mas partículas que los protones de 40 MeV.

A continuación se muestran datos neutrónicos, de fotones, dpa/semana y appm/semana producidos por los protones, calculados con el código mcnp2.6b. Los cálculos se han realizado irradiando una muestra de 0.1x2x2 cm³ (x,yz) siendo x la dirección de propagación del haz. Además, la irradiación se ha llevado a cabo de manera uniforme sobre un círculo de 1 cm² de superficie de la muestra. Las librerías de secciones eficaces que se han utilizado son: la150n 26056.24c para neutrones, mcplib02 26000.02p para fotones, la150h 26056.24h para protones.

La fuente de neutrones que se genera con una intensidad de 1 μA/cm² para ambas energías de los protones (40 y 70 MeV) es de 4.94 E10 n/s para protones de 40 MeV y de 7.069E10 n/s para protones de 70 MeV. Además del número de neutrones por segundo se debe tener en cuenta la energía de los mismos. Para los protones de 70 MeV se generan neutrones de hasta 60 MeV, mientras que para los protones de 40 MeV se generan neutrones hasta energías de 33 MeV, como se puede apreciar en la Figura I.32.

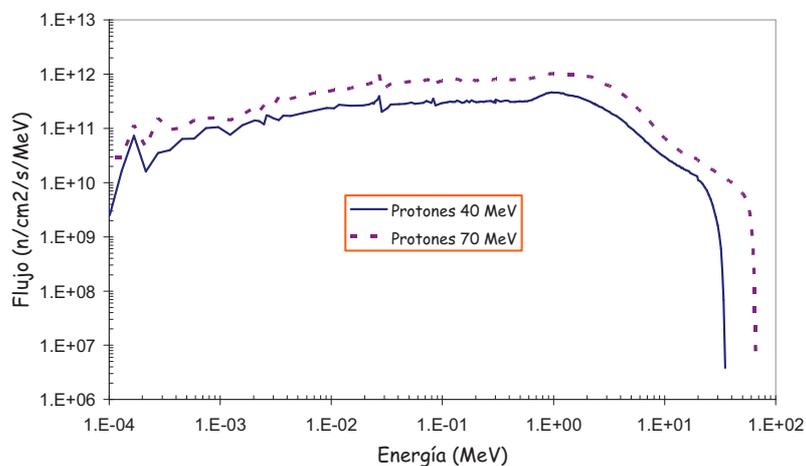


Figura I.32. Espectros neutrónicos generados por los protones de 40 y 70 MeV con intensidades de 79.69 μA/cm² y 158.55 μA/cm² respectivamente, necesarias para generar 1 dpa/semana.

En las gráficas de la Figura I.33 se muestra la comparación de los espectros de fotones generados por los protones de 40 y 70 MeV. El flujo de fotones es muy similar para ambas energías. La fuente de fotones para ambas energías y para

una intensidad de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ es de $1.24\text{E}11$ fotones/s para protones de 40 MeV y de $9.80\text{E}10$ fotones/s para protones de 70 MeV.

Si analizamos los $\text{dpa}_s/\text{semana}$ generados por los neutrones que se han producido por los protones al interactuar con los núcleos del material (Figura I.34) se observa claramente que es del orden de tres veces mayor para el espectro de neutrones de los protones de 70 MeV que el de los protones de 40 MeV. También puede apreciarse que estos valores de $4.07\text{E}-3$ y de $1.34\text{E}-3$ dpa/semana para espectros de neutrones de protones de 70 y 40 MeV respectivamente, es de unos tres órdenes de magnitud más pequeño que los dpa_s generados por los protones directamente, que para estas intensidades es del orden de 1 dpa/semana para ambos. Por tanto en ambos casos este efecto es casi despreciable.

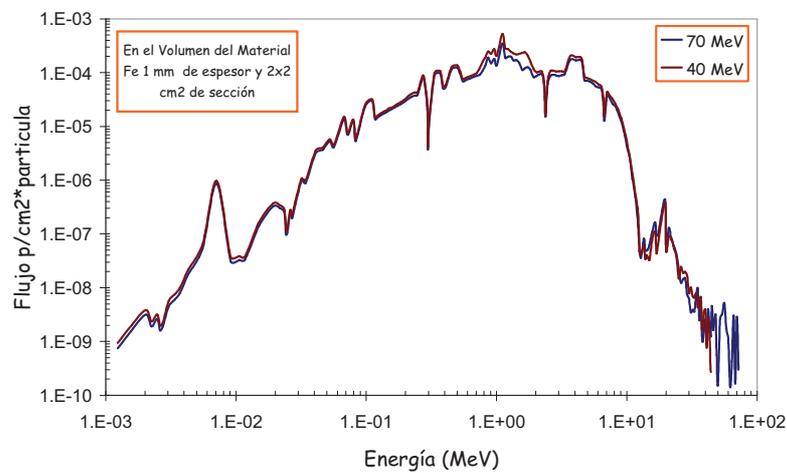


Figura I.33. Comparación del flujo de fotones promediado en el volumen generado por una irradiación de protones de 40 MeV y 70 MeV.

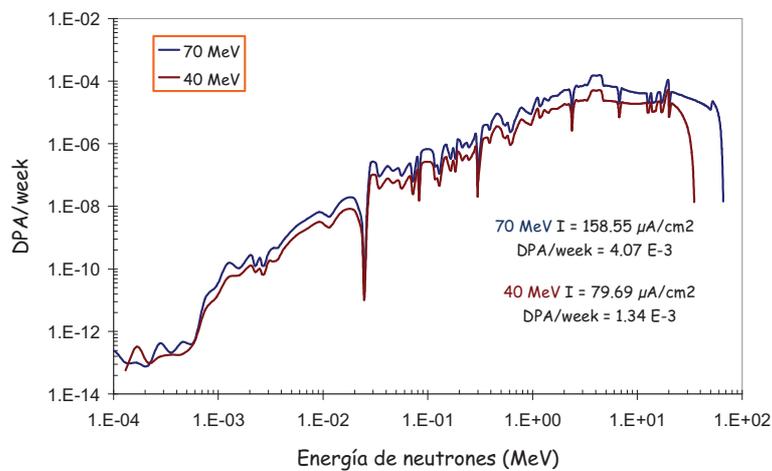


Figura I.34. dpa/semana generados por los neutrones producidos por la irradiación de protones de 40 MeV con una intensidad $79.69 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y de 70 MeV con una intensidad $158.55 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (intensidad necesaria para producir 1 dpa/semana por los protones en la muestra de Fe).

En la Figura I.35 se muestra la producción de H y He por los neutrones generados a su vez por los protones de 40 MeV con una intensidad de $I = 79.69 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y de 70 MeV con una intensidad $I = 158.55 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. El total de átomos de H y He producido por los neutrones es de $3.3\text{E}-2$ appm/semana de H y de $9.11\text{E}-3$ appm/semana de He para protones de 40 MeV y de $7.95\text{e}-2$ appm/semana de H y $1.55\text{E}-2$ appm/semana de He para protones de 70 MeV. Hay que considerar que el valor de la producción de He por los neutrones es de tres o cuatro órdenes de magnitud menor que el He producido por los mismos protones al interactuar con el material, que para estas energías e intensidades es de 30 - 70 appm/semana.

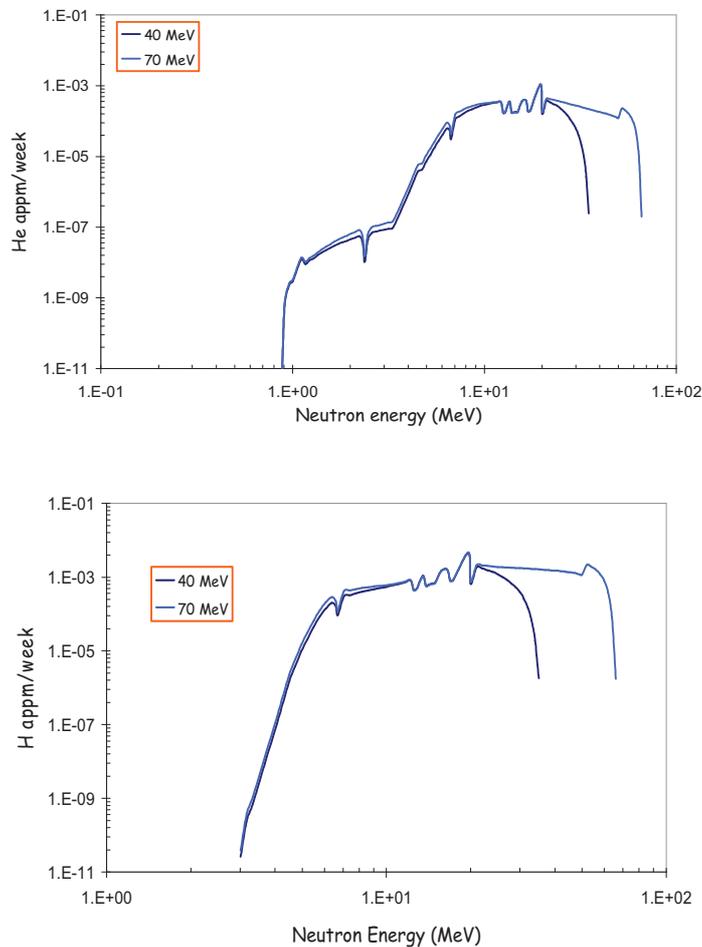


Figura I.35. Producción de gases (H y He) por los neutrones generados por protones de 40 y 70 MeV en una semana de irradiación.

Una vez expuesto que estas radiaciones neutrónicas y de fotones generadas por los protones no cambian significativamente los espectros de daño ni la generación de gases ligeros (H, He), en las siguientes secciones se analizará las consecuencias

importantes de estas radiaciones, como por ejemplo, la generación de impurezas, activación del material, análisis de dosis, tiempos de espera para la entrada de personal a la Nave de experimentación bajo Irradiación, etc.

1.2. Activación, transmutación y cálculo de daño primario en materiales irradiados

1.2.1. Librerías de activación

Actualmente, existe un conjunto limitado de librerías de activación con partículas cargadas. La información utilizada en estas librerías se basa en datos experimentales y/o en cálculos teóricos mediante códigos de simulación de reacciones nucleares. Las versiones más actualizadas se presentaron en el año 2007 en la *Internacional Conference on Nuclear Data* (ND2007) celebrada en Niza.

A continuación se presenta un breve resumen de las capacidades incluidas en estas librerías:

- EAF-2007 (*European Activation File*)¹⁷¹. Elaborada por la UKAEA que incluye 67.925 reacciones con protones hasta un rango energético de 55 MeV. Las secciones eficaces de activación por protones de este código se obtuvieron con el código TALYS-6p. Esta librería incluye 248 reacciones nucleares diferentes con protones. Conteniendo como resultados de núcleos residuales en estado fundamental, primer y/o segundo estado metaestable.
- PADF-2007 (*Proton Activation Data File*)¹⁷². Elaborada por el FZK. Librería en formato ENDF-6. Las secciones eficaces de activación están basadas en cálculos realizados con los códigos TALYS y ALICE/ASH, junto a los datos experimentales existentes.
- También, aunque más limitada, se ha valorado la librería ACSELAM¹⁷³, compilada por *Sumitomo Atomic Energy* (Japón) utilizando el código ALICE-F. Originalmente desarrollada para determinar la activación de la instalación TIARA (*Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application*) del JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). Incluye activación con otro tipo de iones (alfas, O¹⁶, Ar⁴⁰, etc.).

Para la activación con neutrones se ha utilizado la librería **EAF-2007**²², que incluye hasta un total de 250 tipos diferentes de reacciones neutrónicas, con un rango de energía hasta los 55 MeV. Estas librerías se pueden utilizar en multigrupos de energía; en este trabajo se empleará la estructura de multigrupos VITAMIN-J, en 175 grupos de energía ($E < 20$ MeV).

¹⁷¹ R.A. Forrest and J. Kopecky, *EASY-2007: a new generation of activation modelling including neutron-, proton- and deuteron-induced reactions*, EAF 2007, in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007, Nice, France, editors O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge, R.Jacqmin, and S.Leray, EDP Sciences, 2008, DOI: 10.1051/ndata:07170.

¹⁷² A.Yu. Konobeyev, C.H.M. Broeders, U. Fischer, L. Mercatali, I. Schmuck and S.P. Simakov, *The Proton Activation Data File PADF-2007*, in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007, Nice, France, editors O.Bersillon, F.Gunsing, E.Bauge, R.Jacqmin, and S.Leray, EDP Sciences, 2008, DOI: 10.1051/ndata:07352.

¹⁷³ N. Yamano, *Table of Isotope Production Cross Sections (ACSELAM Library)*, in website of JAEA Nuclear Data Center: <http://www.ndc.tokai-sc.jaea.go.jp/ftpnd/sae/acl.html>.

I.2.2. Cálculos de activación por H con medios gruesos

Para obtener las tasas de producción del isótopo Y a partir de la reacción X(p,x)Y se puede suponer que todos los protones interaccionan en un espesor pequeño de dicho material, es decir, se considera la aproximación de material ópticamente grueso ¹⁷⁴. Para este estudio de activación se ha desestimado la producción de neutrones secundarios que podrían inducir activación adicional. Esta hipótesis es válida, en general, cuando las energías de los protones son bajas.

De esta manera, se puede determinar el número de átomos formados (rendimiento de producción) como:

$$N\left(\frac{\text{átomos } Y}{\text{sg}}\right) = n\left(\frac{\text{átomos } X}{\text{cm}^3}\right) * I_p\left(\frac{\text{protones}}{\text{sg}}\right) * \sigma_{PN}(\text{cm}^2) \quad \text{ec. I.10}$$

Para determinar σ_{PN} , se puede calcular mediante:

$$\sigma_{PN} = \int_{x=0}^{x=x_{\max}} \sigma_p(E) dx = \int_{E=3\text{MeV}}^{E=0} \sigma_p(E) \cdot \frac{-dE}{S(E)} = \int_{E=0}^{E=3\text{MeV}} \sigma_p(E) \cdot \frac{1}{S(E)} \cdot dE \quad \text{ec. I.11}$$

donde:

- $\sigma_p(E)$: sección eficaz microscópica de activación por protones de energía E [cm²]
- $S(E)$: poder de frenado de los protones en el medio considerado [MeV/cm] (Figura I..36)

El alcance total de los protones en el material se puede determinar mediante:

$$\lambda_{\max} = \int_{E=0}^{E=E_{\max}[\text{MeV}]} \frac{1}{S(E)} \cdot dE \quad [\text{cm}] \quad \text{ec. I.13}$$

Esta metodología permite predecir la producción de material radiactivo ocasionada por las reacciones con protones. Sin embargo, se requiere que el material sea lo suficientemente grueso para que los protones no escapen del material irradiado.

Para la caracterización de las muestras irradiadas se está trabajando con espesores de hasta 1 mm. Con estos espesores, y para los materiales estudiados, el haz de protones de 10 MeV se frena totalmente. En el caso de 40 MeV, los protones

¹⁷⁴ F.C. Young, D.V. Rose, *Radioactivities produced in commonly used materials by proton and deuteron beams up to 10 MeV*, Atomic Data and Nuclear data Tables, Vol. 64, No. 2, Nov. 1996

atraviesan estos espesores de material. En la Figura I.37 se muestra un ejemplo de la penetración de los protones de distintas energías en distintos materiales.

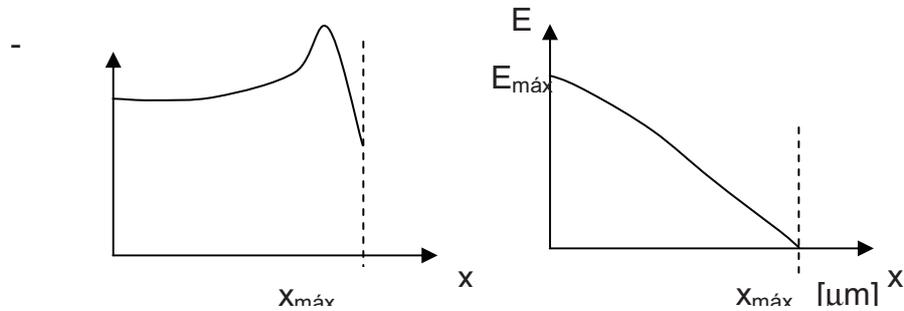


Figura I.36. Evolución espacial de la energía de los protones a medida que se produce la penetración en el medio.

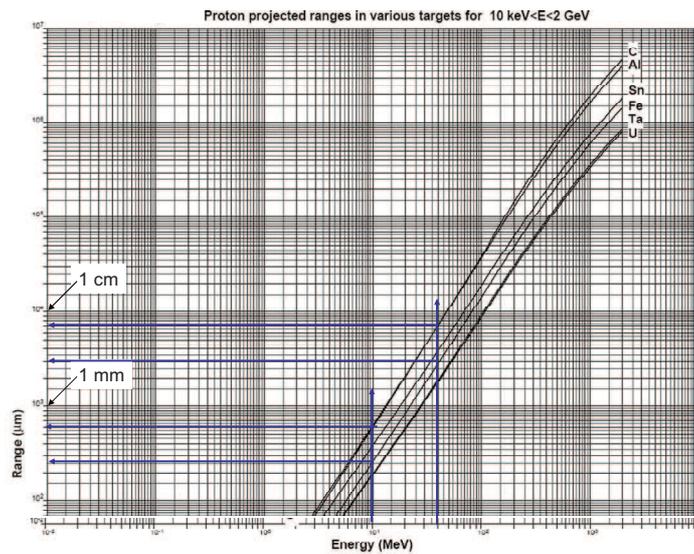


Figura I.37. Rango de penetración de los protones de distintas energías sobre distintos materiales.

Para la determinación del alcance de los iones en estos materiales se utilizará el código SRIM-2006 ¹⁷⁵. El código SRIM (*Stopping and Range of Ions in Matter*) es un grupo de programas que calculan el alcance de los iones (hasta 2 GeV/uma) en la

¹⁷⁵ J. Ziegler: *SRIM2006 code*, <http://www.srim.org>.

materia utilizando mecánica cuántica para el tratamiento de las colisiones ión-átomo (asumiendo que el átomo en movimiento es el 'ión' y el átomo blanco es el 'átomo'). Además, se incluye el programa TRIM (*The Transport of Ions in Matter*) que puede trabajar con blancos compuestos complicados con varias capas y diferentes materiales. Se puede calcular en 3D la distribución de los iones y también todos los fenómenos cinéticos asociados a la pérdida de energía de los mismos: daño en los blancos, escapes, ionización y producción de fotones, etc. Todas las cascadas atómicas en el blanco son seguidas en detalle.

(I) Metodología de cálculo

A continuación se explica el procedimiento utilizado para determinar los rendimientos de producción de material radiactivo. Cabe señalar que la validez de esta teoría se basa en que el material es ópticamente grueso y que la fluencia de la fuente de protones a medida que penetra en el material no sufre modificación (ya que el número de reacciones es muy bajo).

Para realizar este tipo de cálculos se ha utilizado el siguiente procedimiento:

1. Mediante el código SRIM-2006, se determina el valor de S(E) para el material correspondiente y para la energía del protón de 10 MeV (Figura I.38).

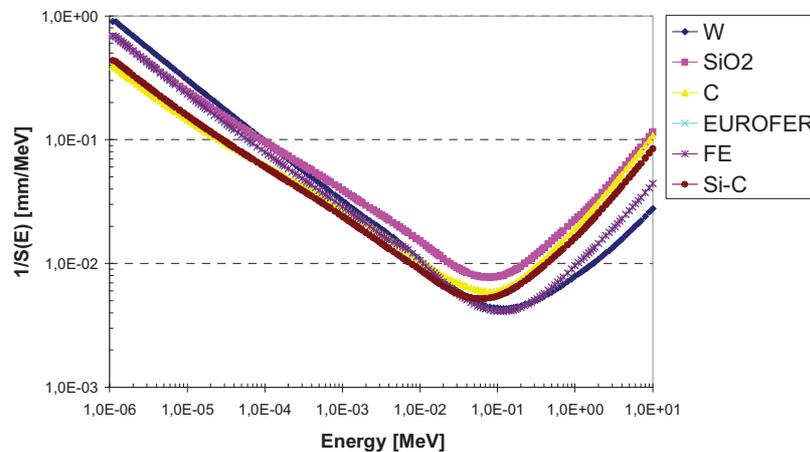


Figura I.38. Factor 1/S(E) [mm/MeV] utilizado para el colapsamiento de las secciones eficaces obtenido mediante SRIM2006.

2. Se realiza el colapsamiento de las secciones eficaces de activación por protones con el código COLLAPS del sistema de cálculo ACAB¹⁷⁶. En este caso, se puede considerar que el flujo o la función de peso utilizada para colapsar las secciones eficaces de activación es:

$$\phi_p(E) = \frac{1}{S(E)} \quad \text{ec. I.14}$$

y los valores calculados por COLLAPS se pueden definir mediante:

$$\sigma_{collaps} = \frac{\int_{E=0}^{E=10\text{MeV}} \sigma_p(E) \cdot \frac{1}{S(E)} \cdot dE}{\int_{E=0}^{E=10\text{MeV}} \frac{1}{S(E)} \cdot dE} = \frac{\sigma_{PN}}{\lambda_{m\acute{a}x}} \quad \text{ec. I.15}$$

Siendo la expresión $\lambda_{m\acute{a}x} = \int_{E=0}^{E=10\text{MeV}} \frac{1}{S(E)} \cdot dE$ [μm], el alcance de los protones en el medio.

El conjunto de materiales estudiado considera algunos materiales puros (Fe, C y W), compuestos de carbono (SiC y SiO₂) y un acero (EUROFER). Se han realizado cálculos con SRIM para determinar la función S(E) y el alcance de los protones de 10 MeV. En la Tabla I.9, se muestran los resultados del alcance calculados por SRIM, y los obtenidos al integrar la función 1/S(E) para la energía dada.

3. El cálculo de la predicción del inventario se realiza mediante el código ACAB. Para realizar este cálculo se utilizan los valores de las secciones eficaces calculadas por COLLAPS, y se modifica el flujo real de protones (I_p) por el factor: $\lambda_{m\acute{a}x}$. quedando:

$$N = n * I_p * \sigma_{PN} = n * I_p * (\lambda_{m\acute{a}x} * \sigma_{collaps}) = n * (I_p * \lambda_{m\acute{a}x}) * \sigma_{collaps} = n * I_{p,mod} * \sigma_{collaps}$$

ec. I.16

El flujo medio de protones se puede definir como: $I_p = \frac{\theta}{\theta + \Delta} I_p^{real}$, con μs (tiempo del pulso), y $\Delta + \theta = (1/\text{frecuencia})$ sg (tiempo entre pulsos). En nuestro caso, se ha definido un valor de:

$$I_p^{medio} = 1\mu A = 1 \times 10^{-6} A \cdot \frac{p/s}{1.6 \times 10^{-19} A} = 6.250 \times 10^{12} p/s \quad \text{ec. I.17}$$

¹⁷⁶ J. Sanz, ACAB Activation Code for Fusion Applications: User's Manual V5.0, Lawrence Livermore National Laboratory UCRLMA- 43238, February 2000.

Tabla I.9. Características de los elementos C, Al, Cu, Ni, W y Ta. Valores obtenidos con el código SRIM2006 para protones de 10 MeV.

Composición del blanco	C	SiC	SiO ₂	Fe	W	EUROFER
Densidad (g/cm ³)	2.25	3.22	2.32	7.87	1.93	7.82
						===== Target Composition === Atom Atom Atomic Mass Name Numb Percent Percent ---- ---- C 6 000.50 000.11 N 7 000.10 000.03 Si 14 000.10 000.05 V 23 000.20 000.18 Cr 24 009.62 009.00 Mn 25 000.40 000.40 Fe 26 088.78 089.24 W 74 000.30 000.99 =====
Alcance en (μm) calculado por SRIM2006	606	482	656	257	168	259
λ _{max} (μm) calculado con COLLAPS	607	483	658	259	174	261

(II) Validación de la metodología

Se realiza el estudio de la activación del *beam dump* del acelerador KOMAC para comparar con los resultados obtenidos con el código MCNPX y la librería protones LA150. Básicamente, la activación se induce por un haz de protones 20 MeV con una intensidad de 4.8 mA sobre un material de grafito. El tiempo de irradiación es de 3 horas.

Para estimar la activación del *beam dump* se utilizó una geometría plana (Figura I.39), formada por varias capas de diferentes materiales. Los protones se detienen en el grafito, pero la generación de neutrones secundarios calculada con MCNPX se transporta para determinar la activación en el resto de componentes.

Los resultados de activación presentados (Tabla I.10)¹⁷⁷, demuestran la importancia que tiene la activación directa de los protones sobre el material de grafito, y el efecto despreciable en el grafito de la activación de neutrones secundarios. Sin embargo, estos neutrones secundarios serán importantes en otros materiales blanco (ejemplo: cobre), que se encontrarán a lo largo de su recorrido. En cualquier caso, la activación inducida por éstos es siempre de menor importancia respecto al haz de protones.

¹⁷⁷ Choong-Sup Gil, Do Heon Kim, Jiho Kim, *An activation analysis of the beam dump of KOMAC*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 562, pp. 993-996, (2006)

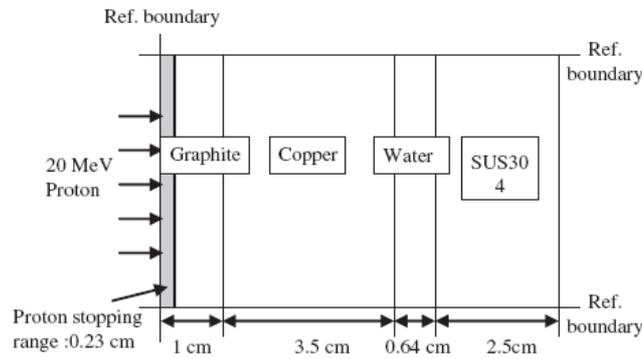


Figura I.39. Esquema de cálculo para los estudios de activación del *beam dump* de KOMAC.

Tabla I.10. Resultados de la activación del *beam dump* de KOMAC calculados con MCNPX. Gil et al¹⁷⁷

Beam dump	Particle	Radioactivity (Curie)			
		Graphite	Copper	SUS-304	Total
Graphite + copper	Proton	7	—	—	9.05
	Neutron	—	1.9	0.15	
Copper	Proton	—	3400	—	3507
	Neutron	—	100	6.8	

La principal fuente de activación se debe a los isótopos generados de C^{11} y N^{13} . La activación es muy grande en el tiempo de la parada del haz, pero decae fuertemente con el tiempo, debido a la corta vida media de estos isótopos.

En la Figura I.40 se presentan los resultados comparativos entre los valores calculados por los autores del artículo, y los evaluados con la metodología propuesta en este trabajo.

La activación total calculada es ligeramente mayor que la presentada por Gil et al. Esta discrepancia se puede deber a la diferencia entre librerías de secciones eficaces utilizadas. Cabe señalar que nuestro resultado predice la formación de otros materiales (tritio) que en principio se habían desestimado en el trabajo de Gil et al. Al cabo de 1e horas de enfriamiento el tritio generado es el responsable de la actividad de este material.

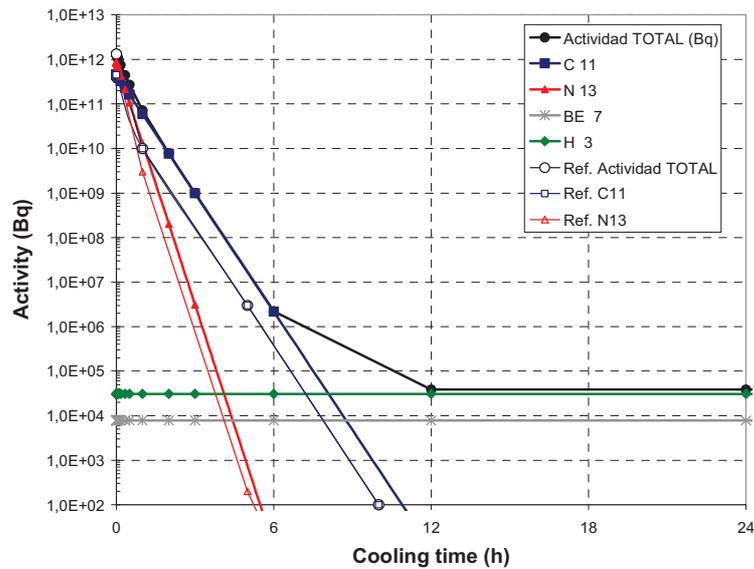


Figura I.40. Comparación de resultados de la activación sólo debida a protones calculado con ACAB/EAF2007 y los cálculos realizados por MCNPX según el trabajo de Gil et al. Se muestran valores totales de radioactividad y la contribución de los isótopos más importantes tras el tiempo de irradiación.

1.2.3. Resultados y cálculos para diversos elementos

A continuación en las Figuras I.41 y I.42 y en las Tablas I.11 y I.12 se presentan los principales resultados de activación y dosis puntual debida a fotones a 1 metro de distancia. Los resultados confirman valores máximos de actividad y dosis para los elementos como el W y Fe (y/o aceros). En los compuestos de C/Si la activación inicial es ligeramente inferior, y decae fuertemente para tiempos inferiores a 1 hora de enfriamiento.

En el caso de C, SiC, y SiO₂ las dosis puntuales son siempre inferiores a 10 μSv/h (Tabla I.11). Para el W, el tiempo de espera para alcanzar dosis < 10 μSv/h sería de aproximadamente 24 horas. Y para los elementos con base de Fe, el tiempo de espera es muy superior, estimada en unos 8 meses.

La activación de C (Tabla I.11) con protones de 10 MeV, produce fundamentalmente N13 (emisor beta), responsable de la activación de este material. Sin embargo, la contribución a la dosis por fotones se debe al C¹⁰ con mucho menor efecto. La activación de elementos con Fe se debe a la formación de Co⁵⁶ (emisor gamma). Y en el caso del W, los isótopos fundamentales son el Re¹⁸² y el Re^{182m}.

En todos los casos, las tasas de transmutación (Tabla I.12) y/o generación de gases (H y He) son despreciables.

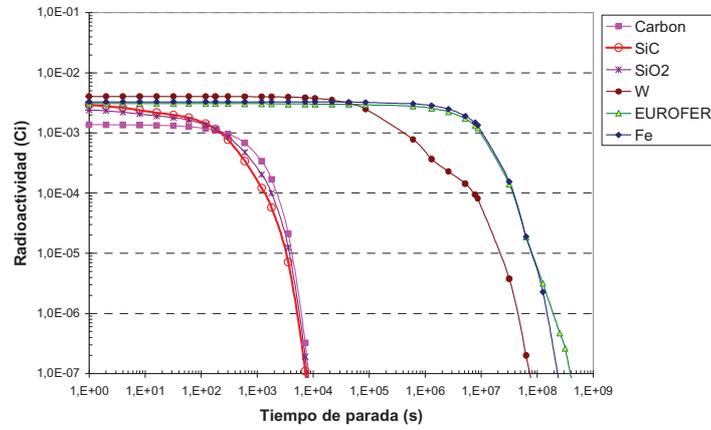


Figura I.41. Evolución temporal de la radioactividad tras una irradiación de un haz de protones de 10 MeV, 1 μ A y durante una semana para distintos materiales.

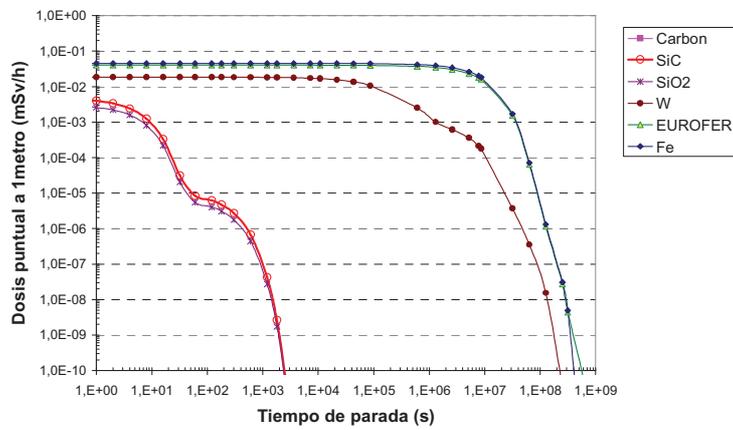


Figura I.42. Evolución temporal de la dosis puntual a 1 m. tras una irradiación de un haz de protones de 10 MeV, 1 μ A y durante una semana para distintos materiales.

Tabla I.11. Valores de actividad y dosis puntual, y los principales isótopos contribuyentes (en %) a la dosis puntual y radioactividad en el instante final de la irradiación.

Instante final de la irradiación (t = 0 sg)				
	Actividad (Ci)	Principales isótopos	Dosis puntual (mSv/h)	Principales isótopos
C	1.37E-03	N ¹³ (100%)	9.41E-12	Be ⁷ (2.8%) C ¹⁰ (97.2%)
SiC	3.05E-03	N ¹³ (15.1%) P ²⁹ (25.6%) P ³⁰ (59.0%)	4.73E-03	P ²⁹ (99.7%)
SiO2	2.50E-03	N ¹³ (32.2%) P ²⁹ (20.4%) P ³⁰ (47.1%)	3.10E-03	P ²⁹ (99.7%)
Fe	3.32E-03	Co ⁵⁶ (94.1%) Co ⁵⁷ (2.8%) Co ^{58m} (1.5%)	4.51E-02	Co ⁵⁶ 899.7%)
W	4.07E-03	Re ¹⁸² (31.5%) Re ^{182m} (37.0%) Re ¹⁸³ (2.6%) Re ¹⁸⁴ (6.2%) Re ¹⁸⁶ (22.5%)	1.85E-02	Re ¹⁸² (52.8%) Re ^{182m} (41.0%) Re ¹⁸⁴ (5.5%)
EUROFER	3.10E-03	Cr ⁵¹ (2.0%) Co ⁵⁶ (89.6%) Co ⁵⁷ (2.6%) Co ^{58m} (1.5%)	4.03E-02	Co ⁵⁶ (99.2%)

Tabla I.12. Tasas de transmutación en appm (átomos por millón inicial de átomos del material) tras 1 semana de irradiación con protones de 10 MeV y 1 μmA.

Elementos	C (Z=6) (appm)	Fe (Z=26) (appm)	W (Z=74) (appm)
H	2.18E-04	2.07E-06	1.59E-08
He	4.07E-04	3.29E-04	1.08E-06
Z⁻¹	1.06E-04	3.27E-04	8.98E-07
Z	-	-	-
Z⁺¹	5.54E-07	1.46E-02	2.16E-03

I.2.4. Cálculo acoplado de transporte (PHITS) y activación (ACAB)

(I) El código PHITS

El código PHITS (*Particle and Heavy Ion Transport code System*)¹⁷⁸ se utiliza para cálculos generales de transporte de partículas de alta energía con Monte Carlo basado en el código NMTC/JAM. Es uno de los códigos más utilizados en cálculos de transporte de hadrones. Utiliza el código JQMD para la simulación de reacciones con iones pesados. El PHITS tiene tres ingredientes importantes para poder calcular las reacciones nucleares de alta energía hasta los 200 GeV: la colisión con iones pesados y su transporte en materiales, y el transporte de neutrones de baja energía basado en los datos nucleares:

- En el PHITS, las secciones eficaces a alta energía se obtienen con el modelo JAM (*Jet AA Microscopic Transport Model*), que es un modelo hadrónico en cascada, que explicita el tratamiento de todos los estados hadrónicos incluidas resonancias y todas las secciones eficaces hadrón-hadrón se parametrizan basándose en los modelos de resonancia y modelos de cadena validándolos con los datos nucleares.
- El PHITS describe el transporte de partículas pesadas y sus colisiones utilizando los códigos JQMD y SPAR. El JQMD (*JAERI Quantum Molecular Dynamics*) es un código de simulación para las colisiones núcleo-núcleo basado en la dinámica molecular. El código SPAR se utiliza ampliamente para calcular los poderes de frenado y alcance de las partículas cargadas e iones pesados.
- El PHITS incluye partes del código MCNPX para el cálculo de neutrones, fotones y electrones a bajas energías basado en librerías de datos nucleares evaluadas. Es más, El PHITS puede utilizar los datos de alta energía como LA150.

A continuación en las Figuras I.43 y I.44 se presentan los resultados de irradiación de un haz de protones de 10 MeV y 40 MeV sobre un material de Fe de 1 mm de espesor. El código PHITS suministra información de la deposición espacial de energía y del daño sufrido por el haz incidente de partículas. Estos cálculos pueden ser importantes en otras evaluaciones de las muestras irradiadas.

Desde el punto de vista radiactivo, el código suministra también las distribuciones energéticas de las partículas (neutrones, protones, alfas, etc.) en el material irradiado (Figuras I.45 y I.47). Esta distribución de neutrones con energías inferiores a 20 MeV se utilizará para determinar la activación inducida, utilizando para ello las librerías de activación neutrónica EAF2007. Además, el código suministra información de los rendimientos (átomos/fuente) de nuevos isótopos generados en la muestra (Figuras I.46 y I.48). Para realizar este cálculo el código PHITS utiliza las librerías LA150.

¹⁷⁸ Hiroshi IWASE1), Koji NIITA2) and Takashi NAKAMURA1, *Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code*, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39 (2002) , No. 11 p.1142-1151.

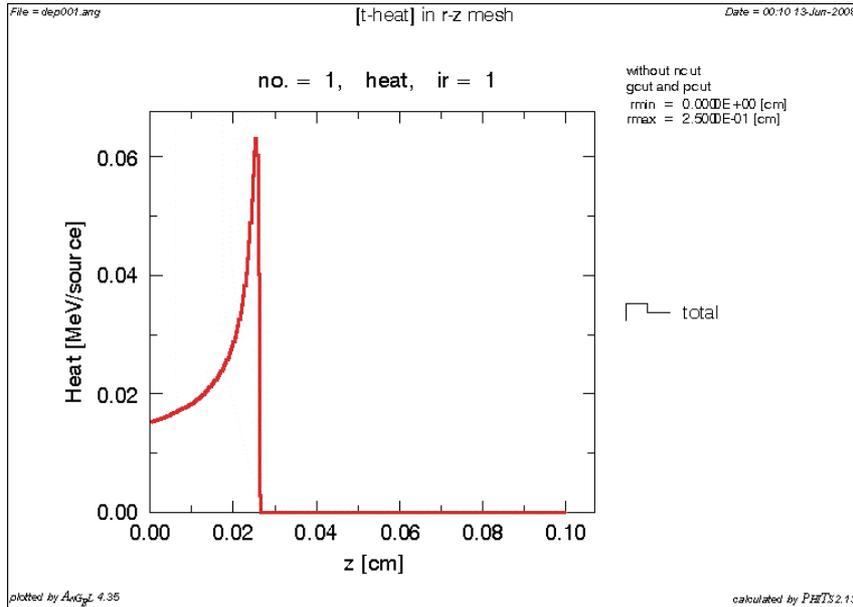


Figura I.43. Deposición de energía (MeV/fuente) para una irradiación de un haz de protones de 10 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

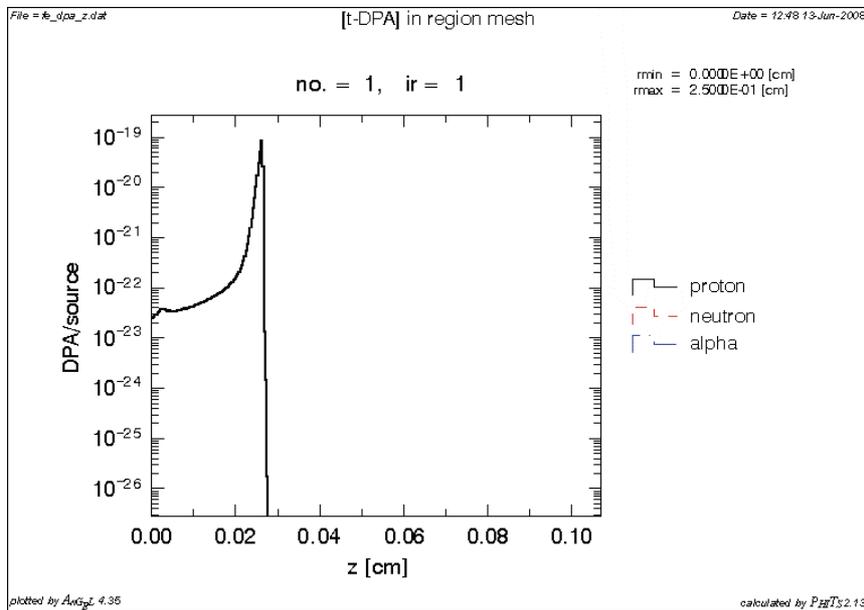


Figura I.44. Cálculos de dpa (dpa/fuente) para una irradiación de un haz de protones de 10 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

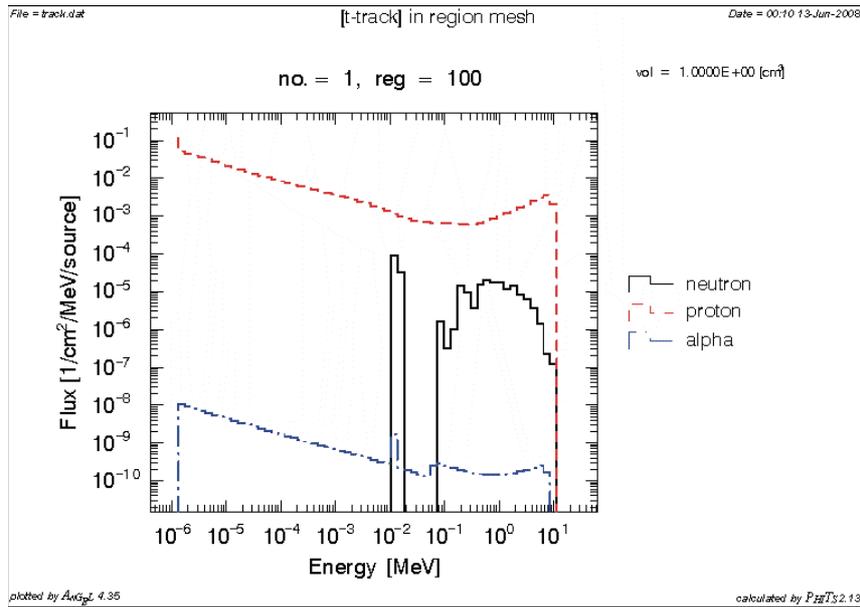


Figura I.45. Espectro de partículas para una irradiación de un haz de protones de 10 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

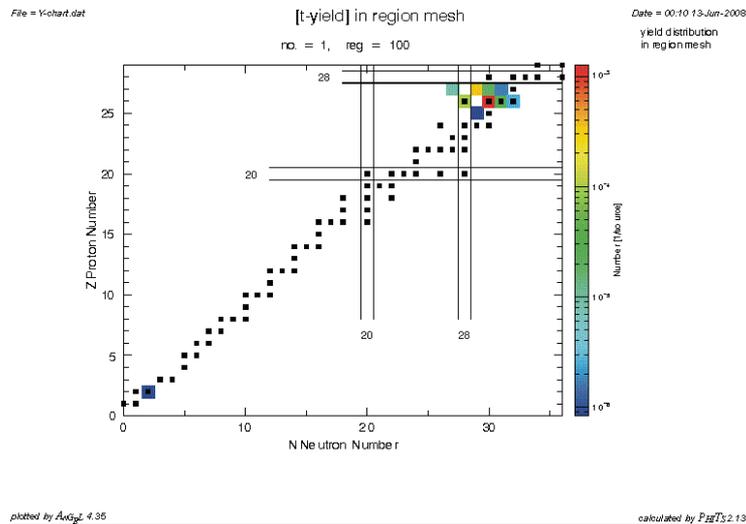


Figura I.46. Generación de nuevos materiales (átomos/fuente) para una irradiación de un haz de protones de 10 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

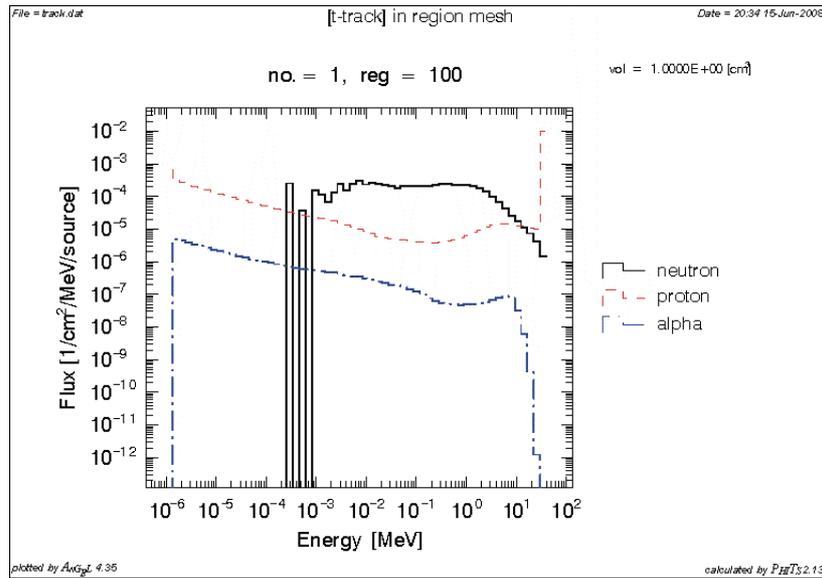


Figura I.47. Espectro de para una irradiación de un haz de protones de 40 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

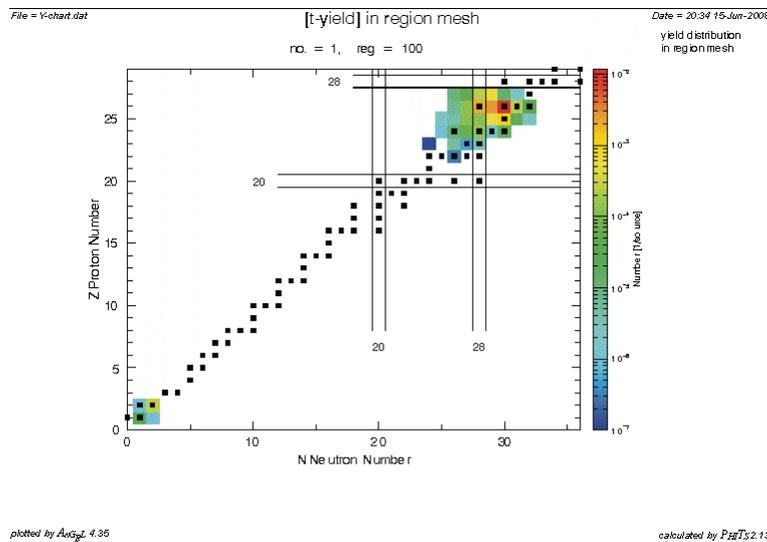


Figura I.48. Espectro de partículas y generación de nuevos materiales (átomos/fuente) para una irradiación de un haz de protones de 40 MeV sobre un material de hierro de un espesor de 1 mm.

(II) Cálculo del inventario radiactivo: PHITS+ACAB

El código PHITS se utiliza para calcular la producción isotópica y el espectro tanto neutrónico como de protones en toda la geometría definida. Calculará la

generación de material radiactivo por las reacciones con protones y determinará la fuente de partículas (neutrones, protones, alfas, etc.) que serán transportadas en el medio. El transporte de protones se realiza con las librerías de datos nucleares LA150.

Para el caso de los neutrones, se ha fijado que por debajo de 20 MeV sólo se realizará el transporte de estas partículas, siendo este término el espectro neutrónico necesario para los cálculos de activación. Se decidió utilizar las librerías de transporte por debajo de 20 MeV, ya que los cálculos de activación van a utilizar la librería EAF2007 en estructura VITJ-175 grupos ($E < 20$ MeV).

Para poder utilizar los resultados del PHITS, se utiliza el programa FEED, para transformar los archivos obtenidos del PHITS al formato de COLLAPS (espectro neutrónico para $E < 20$ MeV) y del ACAB (producción isotópica). En la Figura I.49 se muestra el esquema de cálculo empleado.

Esta metodología se ha aplicado para determinar la activación inducida en un material de hierro de 1mm de espesor irradiado con el haz de protones de 10 MeV (Figura I.50 y I.51). Se observa una buena estimación de la actividad y dosis frente al cálculo realizado con las librerías de activación EAF2007, y supuesto el medio óptimamente grueso. La componente de activación inducida por los neutrones producidos (calculados por PHITS) es despreciable respecto a la activación producida directamente por el haz de protones.

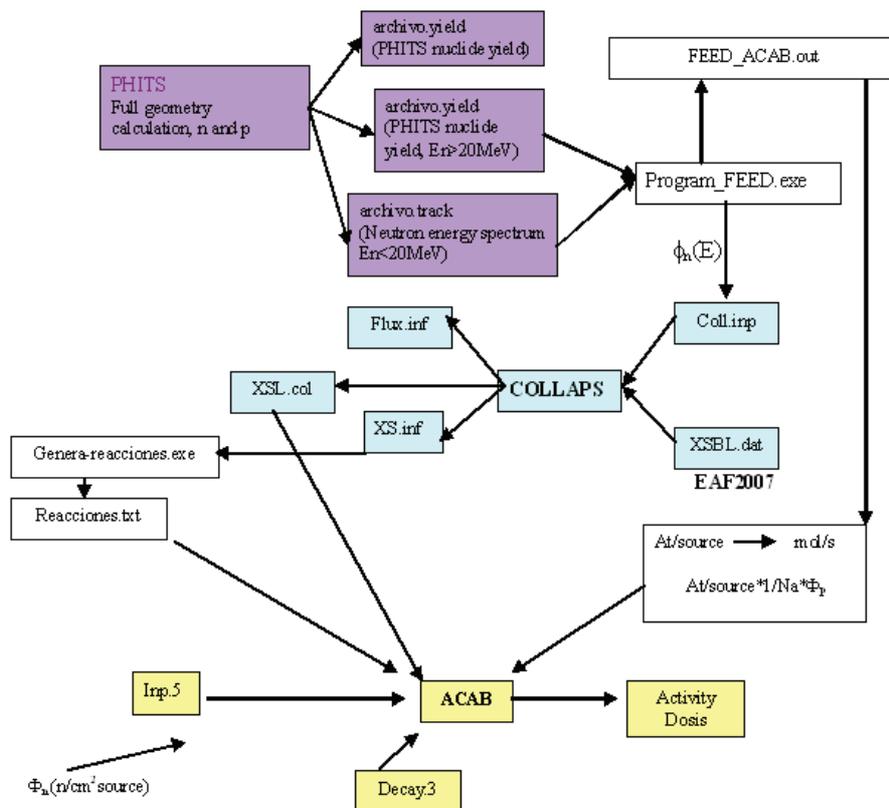


Figura I.49. Esquema de cálculo de la activación mediante los códigos PHITS y ACAB.

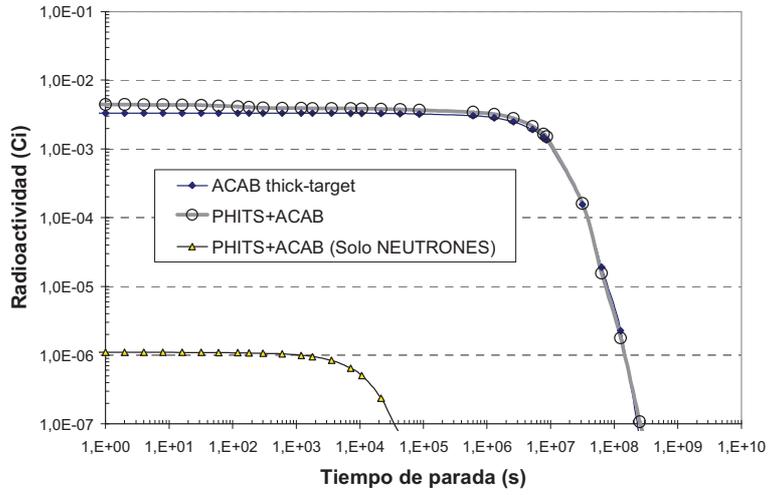


Figura I.50. Evolución temporal de la radioactividad tras una irradiación de un haz de protones de 10 MeV, 1 μ A y durante una semana en hierro.

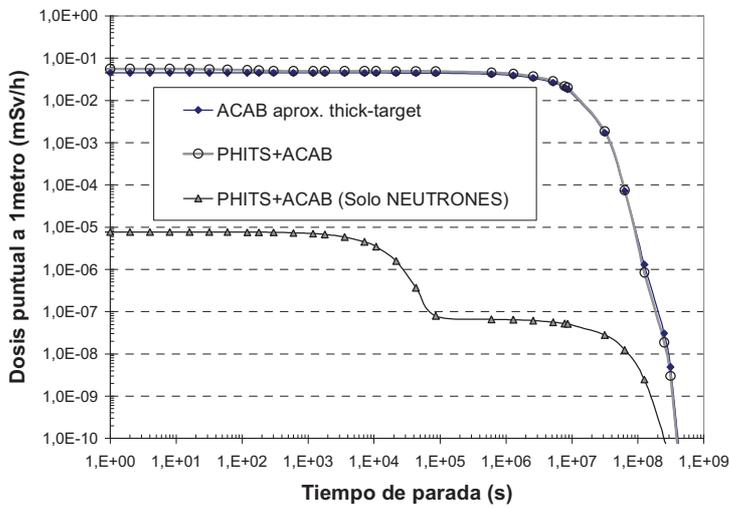


Figura I.51. Evolución temporal de la dosis puntual tras una irradiación de un haz de protones de 10 MeV, 1 μ A y durante una semana en hierro.

En el caso de un haz de 40 MeV (Figuras I.52 y I.53), la activación y dosis inducida es muy superior al producido por un haz de 10 MeV. En este caso, la dosis inferior a 10 $\mu\text{Sv/h}$ se alcanzaría al cabo de aproximadamente 1 año. El efecto de activación inducido por los neutrones generados es igualmente despreciable frente a la activación inducida por los protones.

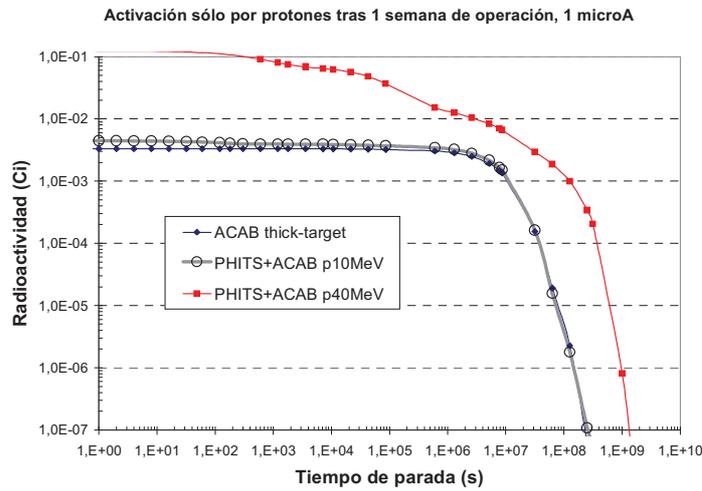


Figura I.52. Evolución temporal de la radioactividad tras una irradiación de un haz de protones de 40 MeV, 1 μA y durante una semana en hierro.

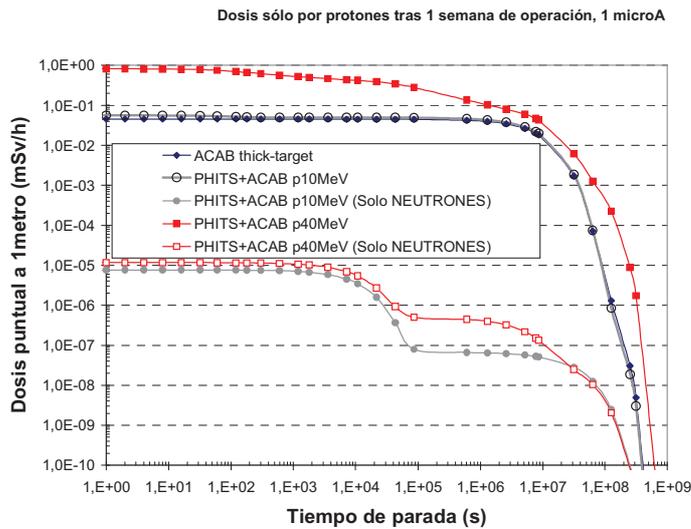


Figura I.53. Evolución temporal de la dosis puntual tras una irradiación de un haz de protones de 40 MeV, 1 μA y durante una semana en hierro.

Las tasas de transmutación integradas (Tablas I.13 y I.14) a lo largo de la semana de irradiación son muy superiores para el caso de 40 MeV. La tasa de producción constante de producción de He es aproximadamente 2.12E-07 appmHe/s. La generación de transmutantes sólidos tiene unas tasas de producción mayores.

Tabla I.13. Valores de actividad y dosis puntual, y los principales isótopos contribuyentes (en %) a la dosis puntual y radioactividad en el instante final de la irradiación en hierro.

Instante final de la irradiación en Fe (t = 0 sg)				
	Actividad (Ci)	Principales isótopos	Dosis puntual (mSv/h)	Principales isótopos
Fe (p 10 MeV) ACAB thick-target	3.32E-03	Co ⁵⁶ (94.11%) Co ⁵⁷ (2.77%) Co ^{58m} (1.53%)	4.51E-02	Co ⁵⁶ (99.66%)
Fe (p 10 MeV) PHITS+ACAB	4.96E-03	Co ⁵⁴ (10.42%) Co ^{54m} (10.46%) Co ⁵⁵ (2.18%) Co ⁵⁶ (72.06%) Co ⁵⁷ (1.30%) Co ^{58m} (3.12%)	5.62E-02	Co ^{54m} (11.63%) Co ⁵⁵ (1.03%) Co ⁵⁶ (87.14%)
Fe (p 40 MeV) PHITS+ACAB	1.29E-01	Cr ⁵¹ (1.54%) Mn ⁵² (5.37%) Mn ^{52m} (8.31%) Mn ⁵⁴ (1.17%) Mn ⁵⁶ (2.40%) Fe ⁵³ (19.39%) Fe ^{53m} (9.12%) Fe ⁵⁵ (1.96%) Co ⁵³ (1.15%) Co ⁵⁴ (3.51%) Co ^{54m} (3.53%) Co ⁵⁵ (34.85%) Co ⁵⁶ (5.34%)	8.15E-01	Mn ⁵² (11.68%) Mn ^{52m} (13.95%) Mn ⁵⁶ (2.71%) Fe ⁵³ (2.48%) Fe ^{53m} (18.99%) Co ^{54m} (7.03%) Co ⁵⁵ (29.68%) Co ⁵⁶ (11.57%)

Tabla I.14. Tasas de transmutación en appm (átomos por millón inicial de átomos del material) del hierro tras 1 semana de irradiación con 1 μ A de protones de 10 MeV y 40 MeV.

Elemento	Fe (appm) p 10 MeV	Fe (appm) p 40 MeV
H	2.08E-06	1.56E-02
He	3.29E-04	1.28E-01
Mn	3.27E-04	8.73E-01
Fe	-	~ -1
Co	1.46E-02	3.13E-01

I.2.5. Activación con iones ligeros

La evaluación de la activación con iones ligeros (alfa, Fe, etc.) requiere estudios más detallados para determinar la cuantía exacta de su contribución. Sin embargo, las estimaciones preliminares realizadas analizando las secciones eficaces de reacciones nucleares de activación de la librería ACSELAM con partículas alfa de $E < 15$ MeV, muestran que los efectos de activación son inferiores a los inducidos por la activación de los protones. Fundamentalmente porque las energías de reacción umbral son muy elevadas.

Algunas referencias destacadas que han trabajado con iones pesados con energías inferiores a 10 MeV/nucleón, consideran que la ventaja fundamental de trabajar con estos niveles de energía es que la activación producida por reacciones nucleares se puede considerar despreciable, lo que permite realizar unos controles de dosimetría mucho más simples. Sin embargo, la producción de electrones acelerados por colisiones con estos iones puede inducir dosis que deben ser estudiados en detalle

179

Por otro lado, la capacidad de simulación de reacciones nucleares con los códigos PHITS o MCNPX, por debajo de estas energías (<10 MeV/nucleón) está limitada, al no disponer de modelos nucleares adecuados para determinar estas reacciones. En la Figura I.54 se muestra un esquema con la descripción de dichas capacidades para el código PHITS.

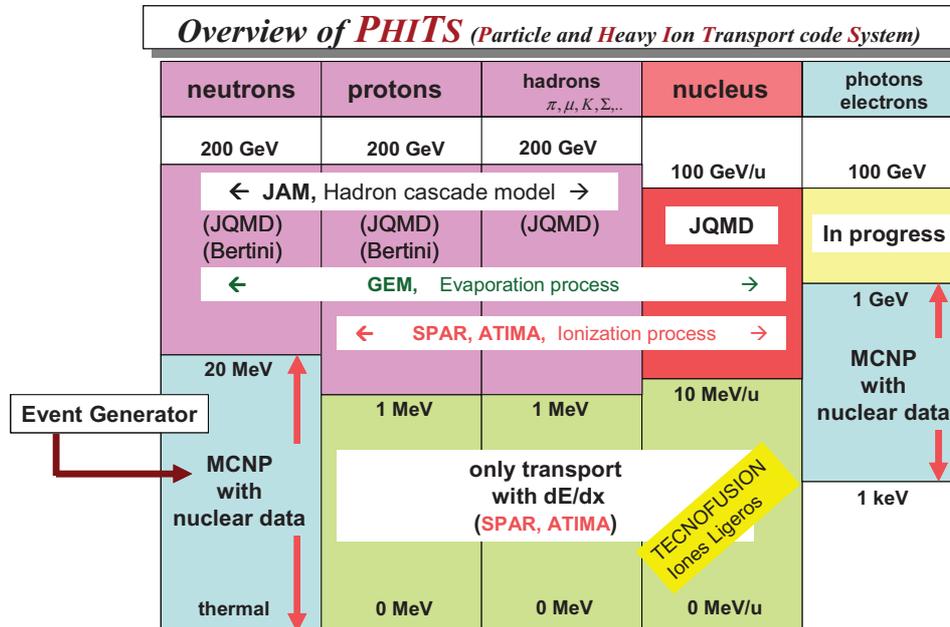


Figura I.54. Descripción de las capacidades de simulación del código PHITS con iones ligeros/pesados. El código sólo simula transporte de partículas para energías inferiores a 10 MeV/nucleón. El modelo JQMD para estas energías no es aplicable.

¹⁷⁹ FA Cucinotta, R Katz, JW Wilson, RR Dubey, *Heavy Ion Track-Structure Calculations for Radial Dose in Arbitrary Materials* NASA Technical Paper, 1995.

I.2.6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado una estimación de los niveles de activación y dosis de diferentes materiales irradiados fundamentalmente con protones de 10 y 40 MeV de energía, y unas condiciones de operación de 1 μ A de intensidad del haz durante una semana de exposición.

Para realizar este trabajo se han utilizado básicamente: i) librerías de activación de protones y neutrones (EAF2007), ii) códigos de transporte de partículas cargadas (PHITS) y librerías de transporte de estas partículas (LA150), iii) y códigos de activación neutrónica y de partículas cargadas (ACAB).

Se ha determinado que la activación se induce en las muestras fundamentalmente por reacciones con los protones, y que la activación con los neutrones secundarios generados puede ser despreciable. Sin embargo, este término deberá tenerse en cuenta para otras estimaciones radiológicas.

En cuanto a las tasas de transmutación para protones, se ha observado que para 10 MeV en Fe los valores son muy pequeños, y que este valor se multiplica por un factor de aproximadamente 10^3 para valores del haz de protones de 40 MeV.

Las principales actuaciones que se proponen realizar en esta área de trabajo se deben enfocar en:

- i) Realizar un estudio paramétrico de los efectos de activación de la muestra que tenga en cuenta todas las condiciones de *TechnoFusión*. Esto implica un estudio en función de las características del haz (intensidad, energía, tiempo de irradiación) y de las características de la muestra (composición, geometría).
- ii) Ampliar el conjunto de materiales estudiado, incluyendo el efecto que las impurezas puedan tener en los estudios de activación.
- iii) Evaluar la producción de transmutantes sólidos y gaseosos de manera pormenorizada, y comparar con resultados experimentales.
- iv) Incluir las librerías de activación por protones PADF en los cálculos.
- v) Completar los estudios en detalle de transmutación con partículas alfa e iones ligeros/pesados incluyendo la generación de secciones eficaces mediante modelos nucleares.
- vi) Disponer de la capacidad para la predicción de incertidumbres en los cálculos de activación en función de las incertidumbres de los datos nucleares, ya que se espera que próximamente se disponga de una nueva versión de librería EAF2007 que incluirá esta información.
- vii) Estudiar la viabilidad, desde el punto de vista de activación, de un degradador de haz para conseguir un espectro de energías lo más amplio y uniforme posible. Definir los materiales, configuración geométrica, deposición de energía, activación, así como un estudio de viabilidad, desde el punto de vista de activación, del *beam dump*.

I.3. Análisis de niveles de dosis en el entorno de muestras irradiadas. Implantación de H y He en muestras de Fe y C

I.3.1. Condiciones de irradiación y herramientas de simulación empleadas

En esta sección se procede a evaluar el campo de dosis en funcionamiento (dosis inmediata) en el entorno de las muestras irradiadas.

Las condiciones de irradiación son las siguientes:

- Geometría: muestra rodeada de aire
- Materiales de las muestras: Fe, C.
- Tamaño de muestra: disco cilíndrico de 2 cm de diámetro y espesor de 1 mm.
- Alineamiento: perfecto alineamiento del eje del haz con respecto al eje de la muestra.
- Irradiación con protones de 10 MeV, y alfas de 15 MeV.
- Intensidad de corriente del haz: 50 pA (condiciones esperadas de trabajo).
- Forma del haz: sección circular de 1 cm² y distribución radial uniforme de la densidad de corriente.
- La densidad de corriente del haz es, por tanto, 50 pA/cm² (correspondiente a los valores anteriormente asignados a la intensidad y área circular del haz).

Hay que indicar que como condiciones extremas de trabajo se espera un valor de intensidad del haz de 1 μ A. Los valores de tasa de dosis correspondientes a este caso se pueden obtener multiplicando por 2×10^4 los valores de los mapas de dosis que se presentan en esta sección para el caso de 50 pA, dada la linealidad del problema con relación a la intensidad de la corriente.

Para tratar el transporte de las partículas cargadas, neutrones y fotones se ha utilizado el programa MCNPX. Para el transporte de protones se han utilizado las secciones eficaces de la librería LA150H. Para el transporte de alfas, las interacciones nucleares se han representado mediante modelos nucleares. La evaluación de la dosis efectiva debida a la radiación inmediata (neutrones y fotones) se ha realizado mediante la magnitud denominada equivalente de dosis ambiental (*ambient dose equivalent*, ICRP-103), que se ha obtenido mediante MCNPX y los factores de conversión de dosis adecuados. Los factores de conversión de fluencia a dosis (para neutrones y fotones) empleados han sido los procedentes de la ICRP74 (1996).

En las figuras que ha continuación se exponen (Figuras desde I.55 a I.58), se presentan los mapas de la tasa de dosis total en Sv/h (debida a las contribuciones de

neutrones y fotones) en un entorno de aproximadamente 6 m desde el centro de la muestra, para las condiciones nominales de trabajo de 50 pA. Estos mapas corresponden a un plano horizontal que pasa por el punto correspondiente al centro de la muestra. El origen de coordenadas se sitúa en el centro de la superficie de incidencia de la muestra, el eje-x de la gráfica se corresponde con el eje del haz y el sentido positivo del eje-x con el de la incidencia del haz. Hay que indicar que el campo de radiación tiene simetría cilíndrica alrededor del eje del haz, por lo que los mapas de dosis dados corresponden no sólo al horizontal indicado, si no a todos los planos del haz cuyo eje se corresponda con el del haz de partículas. Sólo se ha representado el mapa de dosis correspondiente a un semiplano, dada la simetría cilíndrica existente.

I.3.2. Resultados

(I) Irradiación de la muestra de carbono por protones a 10 MeV.

La producción de neutrones y fotones por protón incidente es:

- Fuente neutrónica: $1.29 \cdot 10^{-5}$ neutrones/protón
- Fuente de fotones: $8.22 \cdot 10^{-4}$ fotones/protón

Como puede apreciarse, las dosis son inferiores a $10 \mu\text{Sv/h}$ en el entorno de la muestra para las condiciones de trabajo esperadas (50 pA).

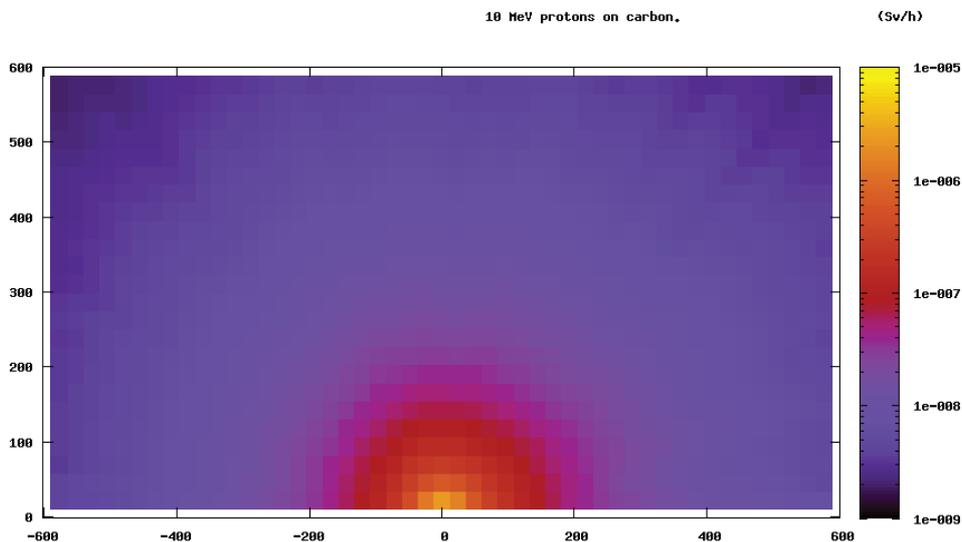


Figura I.55. Equivalente de dosis ambiental debida a neutrones y fotones en el entorno de la muestra de C (Sv/h). Haz de protones de 10 MeV. Condiciones de trabajo 50 pA.

(II) Irradiación de la muestra de hierro por protones de 10 MeV

- Fuente neutrónica: $2.55 \cdot 10^{-4}$ neutrones/protón
- Fuente de fotones: $1.76 \cdot 10^{-3}$ fotones/protón

En el entorno inmediato de la muestra, aproximadamente en un radio de 50 cm, las dosis son ligeramente superiores a los $10 \mu\text{Sv/h}$ para 50 pA.

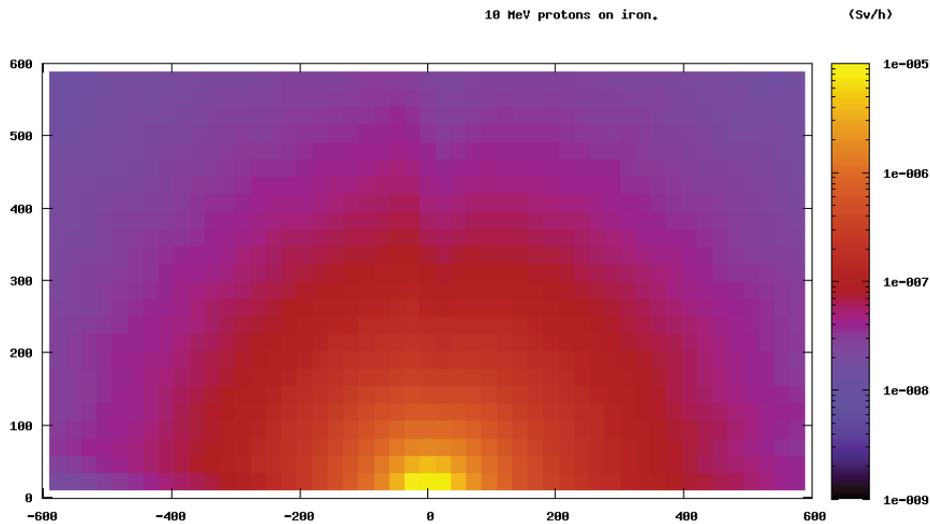


Figura I.56. Equivalente de dosis ambiental debida a neutrones y fotones en el entorno de la muestra de Fe (Sv/h). Haz de protones de 10 MeV. Condiciones de trabajo 50 pA.

(III) Irradiación de la muestra de carbono por alfas a 15 MeV

- Fuente neutrónica: $9.36 \cdot 10^{-6}$ neutrones/alfa
- Fuente de fotones: $1.39 \cdot 10^{-5}$ fotones/alfa

Se observa que los valores máximos de dosis, que tienen lugar en el entorno más próximo de la muestra, son de aproximadamente $1 \mu\text{Sv/h}$. Más allá de 1 m de distancia del centro de la muestra las dosis son inferiores a $0.1 \mu\text{Sv/h}$.

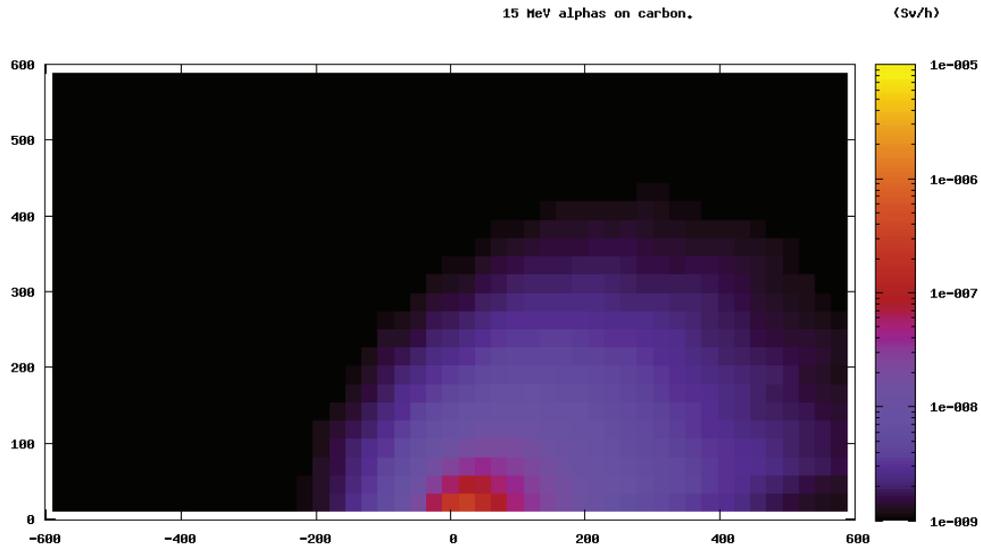


Figura I.57. Equivalente de dosis ambiental debida a neutrones y fotones en el entorno de la muestra de C (Sv/h). Haz de alfas de 15 MeV. Condiciones de trabajo 50 pA.

(IV) Irradiación de la muestra de hierro por alfas a 15 MeV

- Fuente neutrónica: $4.13 \cdot 10^{-6}$ neutrones/alfa
- Fuente de fotones: $2.83 \cdot 10^{-5}$ fotones/alfa

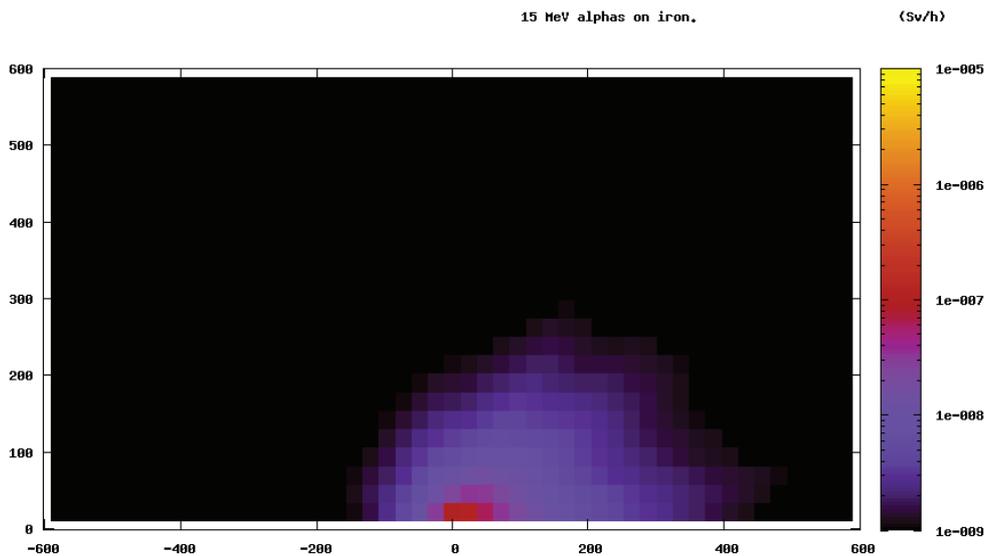


Figura I.58. Equivalente de dosis ambiental debida a neutrones y fotones en el entorno de la muestra de Fe (Sv/h). Haz de alfas de 15 MeV. Condiciones de trabajo 50 pA.

Se observan valores máximos de dosis en el entorno más próximo de la muestra inferiores a $1 \mu\text{Sv/h}$. En regiones situadas a distancias del centro de la muestra superiores a 50 cm, los valores de dosis son inferiores a $0.1 \mu\text{Sv/h}$.

I.3.3. Conclusiones

Se dispone de una metodología computacional (códigos de transporte, datos nucleares y factores de conversión a dosis) que permite hacer una estimación razonable del campo de dosis inmediata en el entorno de muestras de distintos materiales irradiadas por diferentes tipos de partículas cargadas. No obstante, para las fases posteriores de diseño más detallado será necesario hacer un estudio de validación y, si fuera necesario, de desarrollo en relación al tratamiento de la interacción nuclear de las partículas cargadas, protones y alfas en nuestro caso, con los distintos materiales de las muestras a irradiar.

En las irradiaciones con alfas de 15 MeV y para las condiciones de trabajo esperadas (50 pA), los valores de tasa dosis en el entorno de la muestras tanto de C como de Fe son inferiores al valor de $10 \mu\text{Sv/h}$, típicamente usado como límite para la exposición ocupacional de los trabajadores. En las irradiaciones con protones de 10 MeV e intensidades de 50 pA, las dosis en el entorno de la muestras de C y Fe son superiores a las obtenidas en las irradiaciones con alfas de 15 MeV. Para la irradiación de la muestra de C, los valores de dosis en el entorno de la muestra son, aunque mayores que en las irradiaciones con alfas, todavía inferiores al valor de referencia de $10 \mu\text{Sv/h}$. En las irradiaciones de muestras de Fe y para una región entorno a la muestra de aproximadamente 50 cm de radio, se observa que los valores de tasa de dosis son ligeramente superiores a los $10 \mu\text{Sv/h}$ para 50 pA. Consecuentemente, el caso límite de cara a estudiar los posibles requerimientos de blindaje es el de irradiación de muestras de Fe con protones de 10 MeV.

Sin embargo, para todos los casos considerados y suponiendo condiciones extremas de trabajo (estimadas en 1 μA) se obtiene que los valores de tasa dosis en el entorno de la muestra son varios órdenes de magnitud superiores a los $10 \mu\text{Sv/h}$. Dada la linealidad del problema con respecto a la intensidad de la corriente del haz, los campos de dosis en el entorno de las muestras irradiadas bajo otras condiciones de corriente pueden obtenerse escalando linealmente con el factor apropiado los resultados aquí obtenidos.

Se observa también que el campo de dosis correspondiente a la irradiación con protones presenta una simetría bastante acentuada alrededor del centro de la muestra, mientras que para el caso de irradiaciones con alfa la distribución espacial de la dosis es muy asimétrica, estando claramente desplazada hacia las regiones/ángulos correspondientes al entorno del sentido de incidencia del haz.

Anexo II: dimensionamiento y estimación de costes del Ciclotrón de *TechnoFusión* para aceleración de iones pesados

Dimensionamiento y estimación de costes de un ciclotrón para aceleración de iones pesados

Fecha: 10/10/2006
De: Julio Lucas
Doc N°: CIC1-10-10-2006-R0

II.1. Introducción y elección del tipo de acelerador

El presente estudio es un análisis preliminar de las dimensiones y coste que pudiera tener un acelerador para iones pesados de unos 100 MeV, capaz de acelerar iones de hierro, silicio y tungsteno para su aplicación en el estudio de la degradación de los materiales en las condiciones existentes en un futuro reactor de fusión. La corriente que debe ser capaz de proporcionar el sistema es del orden de 1 μ A.

La necesidad de que la instalación sea compacta, indica que un Ciclotrón puede ser la solución preferible. En efecto, un Linac hace necesaria una gran obra civil para alojar un acelerador que al menos debería ser de unos 50 m de longitud. Asimismo, en el rango de energías para el que se ha especificado el acelerador, un Ciclotrón es significativamente más económico que un Linac.

II.2. Dimensionamiento inicial del Ciclotrón

La máxima energía a la que puede acelera un ión de masa atómica A y estado de carga Z, viene dada por:

$$E = K \left(\frac{Z^2}{A} \right)$$

Donde K es una constante del Ciclotrón independiente de la especie que se acelera y que viene dada por el radio exterior del Ciclotrón y su campo magnético. En concreto, para el caso no relativista:

$$K = 48,24 \frac{\text{MeV}}{(\text{T} \cdot \text{m})^2} (\text{BR})^2$$

De hecho el coste de un Ciclotrón está relacionado ante todo con su valor K. Para poder dimensionar el Ciclotrón, es necesario elegir un estado de carga de los iones que se desean acelerar. La principal razón para ello es que el valor K necesario desciende fuertemente con el grado de ionización Z. Sin embargo, si se elige un estado con demasiada carga, la corriente que puede extraerse de la fuente puede ser excesivamente pequeña. Esta elección esta fuertemente relacionada con el tipo de fuente de partículas que desee emplearse, siendo en general las fuentes ECR las que proporcionan un mayor grado de ionización. La elección que hemos realizado puede verse en la Tabla II.1.

En todos los casos, se ha elegido un estado de carga que lleve a un valor K del Ciclotrón semejante y del orden de 110 MeV. Parece de esta manera que los estados de carga elegidos son alcanzables incluso con una fuente de partículas estándar. El campo magnético de referencia para los cálculos es de 1.1 T. En este caso se obtiene un Ciclotrón cuya órbita externa es de unos 3 m de diámetro.

Tabla II.1. Características de Ciclotrón para las diferentes especies estudiadas

Ión	Estado de carga	A	Z ² /A	Etotal [MeV]	K [MeV]	BR [T m]	Diámetro [m]	Frecuencia [MHz]
Fe56	+7	56	0,875	100	114,29	1,54	2,80	2,11
W184	+13	184	0,918	100	108,88	1,50	2,73	1,19
Si28	+5	28	0,893	100	112,00	1,52	2,77	3,02

II.3. Estimación de coste del Ciclotrón

II.3.1. Circuito magnético y bobinas

Para el cálculo de la cantidad de acero necesaria, se emplea la Figura II.1, debida a W. Joho:

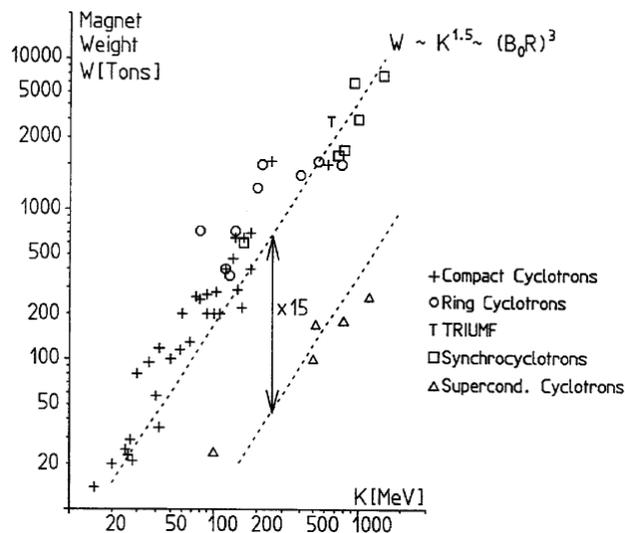


Figura II.1. Gráfico de W. Joho

El peso del imán de un Ciclotrón crece con su valor K. Para el caso de 110 MeV estudiado, el imán debe pesar en torno a las 400 toneladas. Para la estimación de coste del acero, tomaremos la regencia de unos 7 €/kg de acero ya mecanizado a la forma final. Eso nos da un coste del circuito magnético de unos 3 M€.

Respecto a las bobinas, para generar un campo de 1.1 T en un entrehierro de 200 mm, es necesaria una fuerza magnetomotriz de 175 kA•vuelta. Si se diseña la

bobina con una densidad de corriente de 2 A/mm^2 , las bobinas deben tener un volumen de $0,82 \text{ m}^3$, pesando alrededor de 7 toneladas. Un precio objetivo para una bobina acabada (incluyendo material, bobinado e impregnación) es de unos 25 €/kg. Eso implica un coste de 175 k€ para las bobinas. Asimismo, el Ciclotrón deberá emplear una serie de bobinas correctoras integradas en el polo para mantener la condición de resonancia para todas las órbitas. Dado que estas bobinas pueden suponer en total alrededor del 5% de la fuerza magnetomotriz total, pero debido a su dificultad de integración, pensamos que unos 250 k€ es un precio razonable para todas las bobinas.

II.3.2. Fuentes de alimentación

La fuente de alimentación del bobinado principal, es de tipo DC y debe estar altamente estabilizada en unas 100 ppm a largo plazo, en caso contrario no puede garantizarse la estabilidad de la resonancia del Ciclotrón. Para una densidad de corriente de 2 A/mm^2 y un volumen de $0,82 \text{ m}^3$, las pérdidas totales son de unos 56 kW, eso permite emplear una fuente de unos 250 V y 250 A, cuyo coste puede ser estimado en unos 70 k€. Asimismo, se necesitarán una serie de fuentes para alimentar los bobinados correctores. Estas fuentes pueden suponer un 25% de la fuente principal (son más pequeñas pero serán necesarias 3 ó 4). Un presupuesto razonable puede ser 100 k€ para fuentes de alimentación.

II.3.3. Sistema de radiofrecuencia

Para que el Ciclotrón pueda acelerar diferentes especies es necesario que la frecuencia de su sistema de radiofrecuencia (RF) varíe de acuerdo con la última columna de la Tabla II.1. Básicamente, se necesita que el sistema de RF pueda variar entre 1 MHz y algo más de 3 MHz de forma continua. Esto implica que no se debe usar un sistema resonante sino el método del Ciclotrón clásico. Probablemente es suficiente con emplear una D de 180° . Respecto a la potencia que debe emplearse, es muy modesta, porque la corriente es tan sólo $1 \mu\text{A}$. En base a esto se estima que un solo módulo de estado sólido como los que CIEMAT está diseñando para su uso en IFMIF, puede ser suficiente (proporcionando más de 350 W). Asimismo, en este apartado se debe incluir el oscilador primario para generar la señal de frecuencia, la instrumentación de RF y los cables y pasamuros coaxiales para alimentar la D. Un presupuesto razonable puede ser 100 k€ para el sistema RF

II.3.4. Sistema de inyección

El sistema de inyección incluye la fuente de partículas, la línea de baja energía para transferir el haz al centro del Ciclotrón, y los elementos de diagnóstico necesarios. Respecto a la fuente, debido a la baja corriente, puede ser semejante a las usadas en los aceleradores electrostáticos. Además, debe incluir un filtro para seleccionar las especies deseadas. Un presupuesto razonable puede ser 200 k€ para el sistema de inyección.

II.3.5. Sistema de extracción y línea de transferencia de salida

La extracción puede realizarse con un imán de tipo septum (50 k€ sin incluir diseño) sea de tipo magnético o electrostático. La línea de transferencia incluirá una

serie de cuadrupolos de pequeños dipolos correctores de orbita y de BPM. El coste total del equipo sería del orden de 100 k€.

II.3.6. Sistema de vacío

El sistema de vacío esta compuesto por la cámara, las bombas y los elementos de diagnosis. La cámara es un cilindro de acero 316LN de pared gruesa y 3 m de diámetro (60 k€). El sistema de vacío tendrá una etapa primaria, una bomba turbomolecular y posiblemente una bomba iónica. Asimismo, puede resultar interesante introducir la posibilidad de realizar el *bake-out* de la cámara *in situ*. Un coste máximo debe ser 100 k€.

II.4. Diseño

El diseño completo del Ciclotrón, desde recopilar las necesidades de los usuarios hasta tener los planos de fabricación es un proceso complejo y caro. Sin tener más datos, se puede estimar hasta en un 50% del coste de los materiales (típico de los procesos en los que solo se realiza un elemento de un diseño nuevo).

II.5. Resumen

La Tabla II.2 resume el estudio preliminar de costes realizado. Es muy importante tener en cuenta que el coste no incluye ninguno de los elementos que la instalación de soporte debería proporcionar, alimentación AC, refrigeración, climatización, protección radiológica, etc.

Además, es importante resaltar el carácter totalmente preliminar del estudio, lo cual implica una margen de indeterminación que puede ser superior al 25% en el conjunto.

Tabla II.2. Resumen de los costes del Ciclotrón de valor K 110

Costes del Ciclotrón k=110	
Núcleo y polos	3000
Bobina	250
Fuentes de alimentación	100
Sistema RF	100
Sistema de vacío	160
Sistema de inyección	200
Sistema de extracción	150
Subtotal	3960
Diseño	1980
Total	5940