

RADIOISÓTOPOS DE USO MÉDICO Y ENERGÍA NUCLEAR



JAVIER GALLO CARRASCO
Director de Proyectos
EMPRESARIOS AGRUPADOS



MARÍA ISABEL ORTIZ
Investigadora
CIEMAT



NOELIA BALLESTEROS
Jefa de Proyecto
EMPRESARIOS AGRUPADOS



JOSÉ IGNACIO PORRAS
Catedrático Universitario
UNIVERSIDAD DE GRANADA



FERNANDO MOTA
Investigador
CIEMAT



JAVIER PRAENA
Profesor Universitario
UNIVERSIDAD DE GRANADA

Las energías nucleares de fisión y de fusión son antagonistas en su naturaleza, sin embargo, con ambas es posible la producción de radioisótopos de uso médico.

INTRODUCCIÓN

La **energía de fisión** se basa en una reacción atómica en la que un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, con gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones. Estos neutrones, a su vez, pueden ocasionar más fisiones al interactuar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente. Este efecto multiplicador se conoce con el nombre de reacción en cadena.

Se trata de una tecnología madura y, actualmente, existen en el mundo varios reactores de fisión en los que se concentra la mayor parte de la producción de algunos de los radioisótopos

de uso médico de mayor interés. Utilizando como ejemplo unos de los radioisótopos de mayor demanda, el molibdeno 99 (^{99}Mo), se utiliza en el 86% de los procedimientos de diagnóstico SPECT (*Single Photon Emission Computer Tomography*), acumulando unos 30 millones de procedimientos anuales en el mundo, aproximadamente el 97% de su producción se realiza en reactores nucleares y, el resto, en ciclotrones.

Una visión general de la producción de ^{99}Mo en el mundo se obtiene con la **Tabla 1**.

Se observa cómo, en muchos de los casos, se trata de reactores nucleares con una vida útil remanente corta. De hecho, el *High Flux Reactor* (HFR) de Petten (Países Bajos) cesará definitivamente su operación en breve (2030), dejando de producir un 30% del total.

Los reactores operativos, en ocasiones, sufren paradas prolongadas, conduciendo a un desabastecimiento

Reactor (Combustible)	Blancos actuales	Producción prevista de ⁹⁹ Mo de semanas/año	Capacidad disponible prevista por semana (6-day ⁹⁹ Mo)	Estimated end of operation
BR-2 (HEU)	LEU	29	8 600	2036
HFR (LEU)	LEU	38	6 200	2030
LVR-15 (LEU)	LEU	30	3 000	2028
MARIA (LEU)	LEU	36	2 200	2040
MURR (HEU)	EnMo in CRR	52	3 000	2037
OPAL (LEU)	LEU	44	3 200	2057
RA-3/RA-10 (LEU)	LEU	46	500	2027 or earlier based on RA-10 introduction
SAFARI-1 (LEU)	LEU	44	3 000	2030
RIAR (HEU)	HEU	50	540	At least until 2025
KARPOV5 (HEU)	HEU	48	350	At least until 2025

Notes: EnMo = Enriched Mo98 target, HEU >20% enriched Uranium, LEU <20% enriched Uranium

Tabla 1. Producción de Mo-99 en el mundo (2023).

mundial de ⁹⁹Mo y a la necesidad de posponer numerosos procedimientos de diagnóstico decisivos para la vida de los pacientes [1]. Esta situación dio lugar en Europa a la creación, por parte de la Comisión Europea, del Observatorio Europeo para el suministro de radioisótopos médicos [2]. La Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA), asimismo, alertó sobre la escasez de este radioisótopo, instando a la comunidad internacional al desarrollo de pequeñas instalaciones que permitieran la producción suficiente que garantizase el abastecimiento local [3]. A día de hoy, aunque existen ideas en desarrollo, no se han encontrado soluciones definitivas.

Por lo tanto, es prioritario encontrar nuevas fuentes de producción de ⁹⁹Mo para compensar su inevitable escasez a nivel mundial.

El potencial despliegue de los *Small Modular Reactors* (SMR) podría formar parte de esa solución. Los SMR pueden producir radioisótopos de interés médico en cualquiera de sus modalidades:

- Reactores de agua ligera (LWR) de la generación GIII+, mediante neutrones térmicos.
- Reactores refrigerados por metales fundidos (generación GIV), con neutrones rápidos. Dentro de estos, cabe destacar los reactores *Accelerator-driven subcritical*

systems (ADS). Se trata de reactores que reutilizan combustible gastado. Para mantener la reacción de fisión, cuentan con una fuente externa de neutrones por espalación, a su vez producida por un acelerador de partículas. Una de sus ventajas reside en que ofrecen una doble fuente de producción de radioisótopos de interés médico: los propios neutrones rápidos generados por espalación y las partículas aceleradas mediante el uso de un haz secundario, por la acción de un dispositivo tipo *kicker*.

Por su parte, la **energía de fusión** se basa en un concepto sencillo, la unión de dos núcleos atómicos ligeros que se combinan para formar un núcleo más pesado, emitiendo enormes cantidades de energía. Sin embargo, su producción no es sencilla debido a los grandes retos tecnológicos que conlleva. Para hacer frente a estos retos, hay varias iniciativas en marcha, destacando las siguientes:

ITER, cuya construcción se inició en 2007, con el objetivo de demostrar que la energía de fusión es científica y tecnológicamente viable. ITER podría ser el primer dispositivo de fusión en producir energía neta, manteniendo la reacción de fusión durante largos períodos de tiempo.

Después de ITER se prevé la construcción de centrales de demostración para constatar que la fusión nuclear controlada, puede generar energía eléctrica neta. La planta

DEMO será la sucesora de ITER. Con la transición de ITER a DEMO, se pretende que la fusión pase de ser un ejercicio basado en la ciencia y en el laboratorio, a materializarse en un programa impulsado por la industria y la tecnología, al tener como objetivo la inyección de electricidad en la red.

El dispositivo *International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented NEutron Source* (IFMIF-DONES) es una infraestructura de investigación novedosa para probar, validar y calificar los materiales que se utilizarán en futuras plantas de energía de fusión, como DEMO. Se trata de un acelerador lineal de partículas, deuterones que, al incidir sobre una lámina de litio líquido, generará un flujo de neutrones de características similares a los producidos como consecuencia de la reacción de fusión. Esto permitirá someter materiales a condiciones comparables a las que soportarán en los reactores de fusión, pero proporcionando una exposición acelerada.

El acelerador IFMIF-DONES es la infraestructura que da soporte al programa DONES, cuyo objetivo es desarrollar una base de datos de comportamiento de materiales necesarios para la construcción de reactores de fusión, frente a la irradiación. Alrededor de este programa también se desarrollan proyectos de I+D, entre los que se encuentra el DONES EVO [4]. Este proyecto pertenece a la convocatoria 2021 del Centro para el Desarrollo y la Innovación (CDTI) para proyectos Misiones Ciencia e Innovación. En concreto, es el Proyecto MIG-20211066, subvencionado por el CDTI y apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Empresarios Agrupados Internacional (EA) ha coordinado este proyecto, finalizado en 2025, en el que participó junto con otros seis socios. Algunos de los objetivos específicos de EA en el proyecto fueron:

- Definir los requisitos necesarios para la producción de radioisótopos con fines médicos en la instalación IFMIF-DONES de manera viable.
- Realizar un estudio que abordase el diseño conceptual de los componentes necesarios para la producción de radioisótopos con fines médicos en IFMIF-DONES.

Se comprueba, pues, cómo estos objetivos principales del proyecto DONES EVO, complementarios para el programa DONES en relación con la propia consecución de la energía de fusión, permiten la contribución de esta fuente de energía a la medicina gracias a su potencial para la producción de radioisótopos en IFMIF-DONES.

El desarrollo del proyecto DONES EVO ha permitido la estimación mediante cálculos de producciones de radioisótopos de interés médico, tanto con neutrones como con deuterones.

RADIOISÓTOPOS DE USO MÉDICO

El acelerador de deuterones IFMIF-DONES ofrece 3 opciones diferentes para la producción de radioisótopos de uso médico, según los flujos de partículas que proporciona:

- Deuterones a 5MeV.
- Deuterones a 40MeV.
- Neutrones de alta energía, entre 1 y 20 MeV.

Los deuterones se introducen en el reactor con una energía de 100keV, experimentando una primera etapa de aceleración, hasta los 5MeV. A continuación, tras otra etapa de aceleración, alcanzan una energía de 40MeV. Este flujo incide sobre una cortina de litio líquido. Las reacciones nucleares en el litio (d, xn) originan un alto flujo de neutrones que incide sobre las muestras de los materiales que se quieren probar, en condiciones comparables a las de la pared de un reactor de fusión. Potencialmente, el haz a 40MeV se desviará para otros propósitos mediante un selector de haz [4]. Este proceso se representa gráficamente en las **Figuras 1 y 2**.

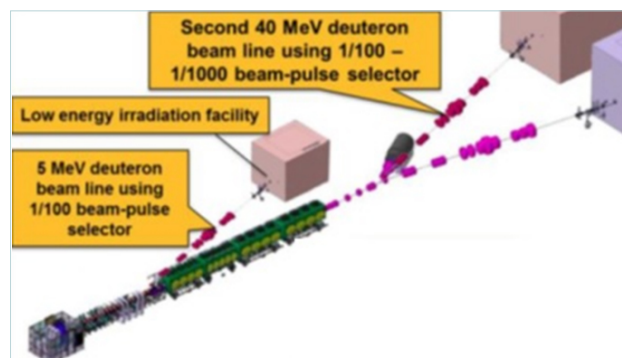


Figura 1. Vista esquemática de las dos etapas de aceleración de IFMIF-DONES.

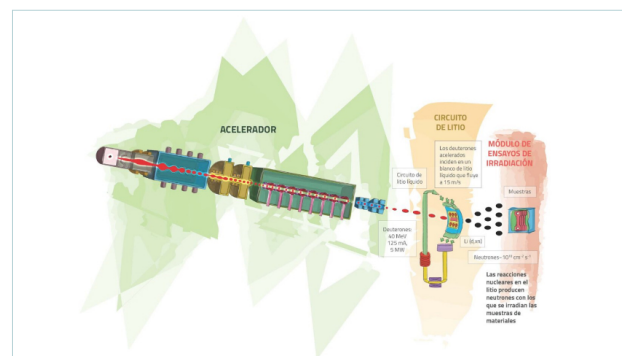


Figura 2. Vista esquemática de la incidencia de los deuterones a 40MeV sobre la cortina de litio y generación de neutrones.

RADIOISÓTOPOS A PARTIR DE DEUTERONES

En el proyecto DONES EVO [4] se han analizado los potenciales radioisótopos de uso médico producibles a partir de deuterones, tanto para diagnóstico (técnica de diagnóstico por imagen PET (Positron Emission Tomography)), como para tratamiento [5] (**Tabla 2**).

En la **Figura 3** se muestran sus aplicaciones más usuales en terapia.

En la referencia [6] se determinaron los requisitos técnicos, así como la estimación de producción de radioisótopos para diagnóstico, mediante Tomografía por Emisión de Positrones (PET) en IFMIF-DONES, a partir del haz de deuterones a 5 MeV.

En concreto, los trabajos desarrollados se han centrado en dispositivos para la producción de los siguientes radioisótopos: ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O y ^{64}Cu .

	Reacción	Aplicación
^{11}C	$^{10}\text{B}(\text{d},\text{n})$ baja E	Multitud de diagnósticos PET
^{13}N	$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})$ baja E	Diagnósticos PET en cardiología
^{15}O	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})$ baja E	Diagnósticos PET en cardiología
$^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$	$^{69}\text{Ga}(\text{d},3\text{n})$ alta E	Diagnósticos PET del cáncer
^{64}Cu	$^{63}\text{Cu}(\text{d},\text{p})$ baja E	Inmuno PET y terapia
^{89}Zr	$^{89}\text{Y}(\text{d},2\text{n})$ alta E	PET metabólico
^{44}Sc	$^{44}\text{Ca}(\text{d},2\text{n})$ alta E	PET
$^{94\text{m}}\text{Tc}$	$^{92}\text{Mo}(\text{d},2\text{n})$ alta E	PET
^{177}Lu	$^{176}\text{Yb}(\text{d},\text{p})$ alta E	Terapia del cáncer diversos tumores
^{90}Y	$^{89}\text{Y}(\text{d},\text{p})$ baja-alta E	Terapia del cáncer por radioembolización
^{161}Ho	$^{161}\text{Dy}(\text{d},2\text{n})$ alta E	Terapia del cáncer por electrones Auger
^{125}I	$^{126}\text{Te}(\text{d},3\text{n})$ alta E	Terapia del cáncer por electrones Auger
^{111}In	$^{112}\text{Cd}(\text{d},3\text{n})$ alta E	Terapia del cáncer por electrones Auger
$^{195\text{m}}\text{Pt}$	$^{\text{nat}}\text{Pt}(\text{d},\text{x})$ alta E	Terapia del cáncer por electrones Auger

Tabla 2. Radioisótopos producibles con deuterones. Baja E se refiere al rango hasta 5 MeV, y alta E hasta 40 MeV.

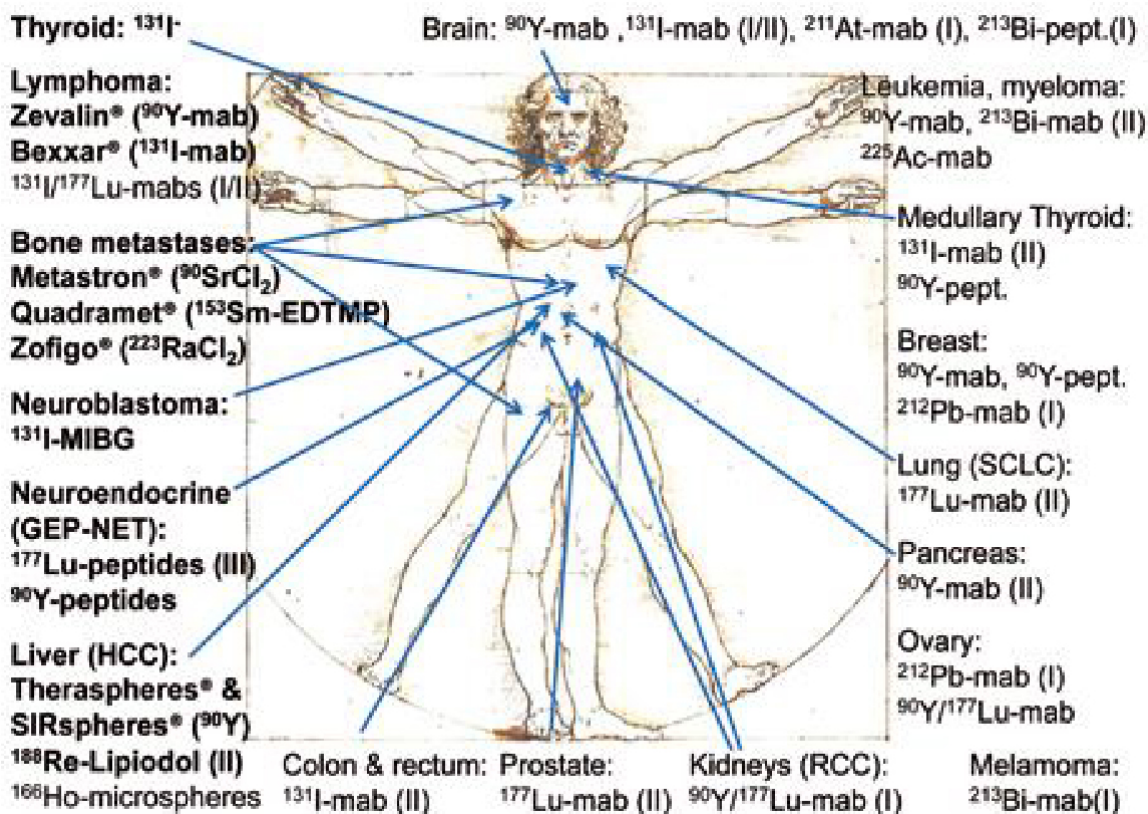


Figura 3. Aplicaciones más usuales en terapia, incluyendo algunas aplicaciones nuevas en ensayos clínicos marcados según su fase (I, II o III).

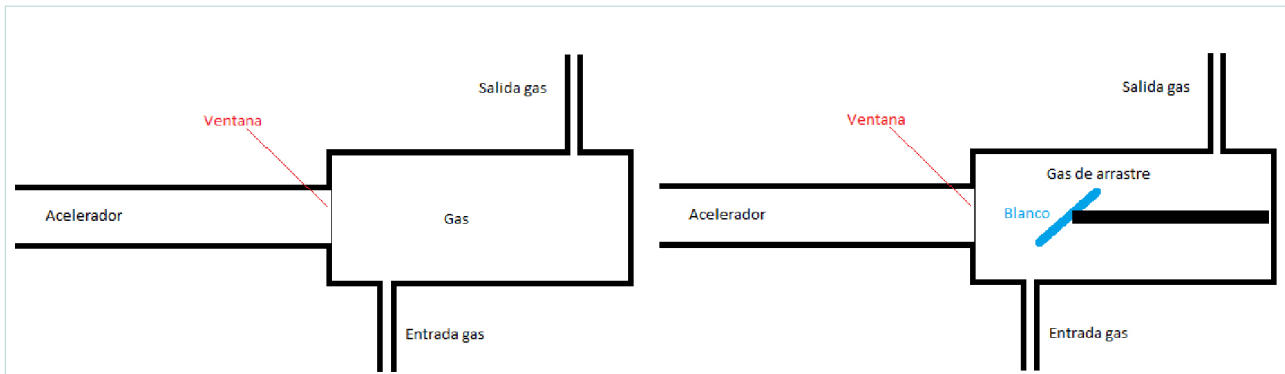


Figura 4. Visión esquemática de un blanco gaseoso (izquierda) y un blanco sólido (derecha).

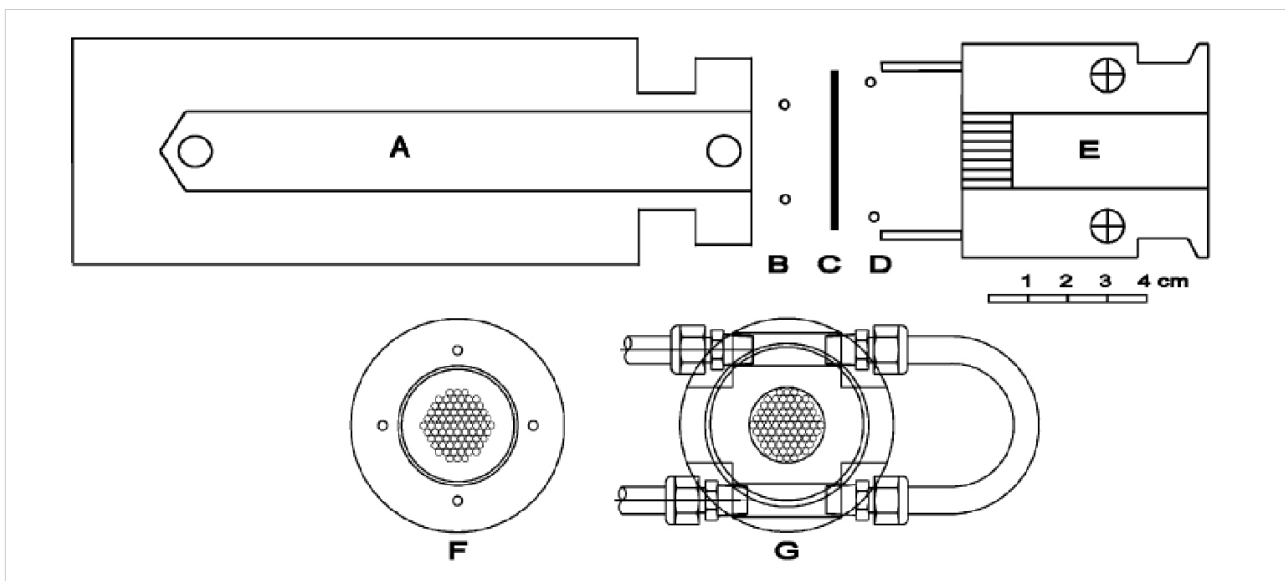


Figura 5. Croquis de un montaje típico de blanco gaseoso con rejilla de soporte enfriada por agua, diseñada para conectarse al acelerador a través de una brida.

Leyenda: (A) cuerpo del blanco gaseoso; (B) junta tórica de Viton; (C) lámina de entrada; (D) junta tórica de Viton; (E) rejilla de soporte refrigerada por agua; (F) rejilla de soporte vista desde el blanco y (G), vista de la rejilla del lado del acelerador.

En estos dispositivos, el haz de partículas incide sobre un blanco, facilitando la correspondiente reacción nuclear. Mediante un gas de arrastre, se extraen las especies generadas para su posterior uso. A su vez, el blanco puede estar en estado sólido o gaseoso, según se muestra en las **Figuras 4 y 5**.

El acelerador mantiene cierto vacío en su interior, existiendo, pues, una diferencia de presiones en relación con el blanco, gaseoso o sólido, por lo que se hace necesaria una ventana que separe ambas atmósferas que, a su vez, puede requerir de refrigeración para extraer la energía depositada en ella por las partículas cuando la atraviesan.

Se muestran a continuación los componentes principales del montaje de un dispositivo de producción de radioisótopos a partir de un haz de deuterones.

Se ha llegado a desarrollar el diseño conceptual de un dispositivo [7] y a fabricar prototipos para ensayos, como el que se muestra en la **Figura 6**.

Por lo que respecta a la estimación de producción, se han obtenido los siguientes resultados para las especies



Figura 6. Prototipo de dispositivo mejorado para la producción en blancos gaseosos y sólidos.

Ciclotrón				IFMIF-DONES		
	Reacción	Blanco	GBq prod	Reacción	Blanco	GBq producidos
^{18}F	$p+^{18}\text{O} \rightarrow n+^{18}\text{F}$	H_2^{18}O (liq) enriquecida	142	$d+^{20}\text{Ne} \rightarrow \alpha+^{18}\text{F}$	Ne (gas)	461
^{11}C	$p+^{14}\text{N} \rightarrow \alpha+^{11}\text{C}$	N_2 (gas)	50	$d+^{10}\text{B} \rightarrow n+^{11}\text{C}$	B_2O_3 (sol)	1260
^{13}N	$p+^{13}\text{C} \rightarrow n+^{13}\text{N}$	C (sol) enriquecido	48	$d+^{12}\text{C} \rightarrow n+^{13}\text{N}$	C (sol) natural	430
^{15}O	$p+^{15}\text{N} \rightarrow n+^{15}\text{O}$	N_2 (gas) enriquecido	157	$d+^{14}\text{N} \rightarrow n+^{15}\text{O}$	N_2 (gas) natural	777
^{64}Cu	$p+^{64}\text{Ni} \rightarrow n+^{64}\text{Cu}$	Ni (sol) enriquecido	43	$d+^{63}\text{Cu} \rightarrow p+^{64}\text{Cu}$	Cu (sol)	59

Tabla 3. Producción estimada de radioisótopos PET con 1mA de deuterones de 5 MeV comparada con la de los ciclotrones.

analizadas. Se comparan los resultados con la producción estándar en un ciclotrón (una de las formas de producción actual) (**Tabla 3**).

Es de destacar la alta producción de ^{11}C que podría conseguirse en IFMIF-DONES, lo que estimularía la construcción de un centro de diagnóstico centralizado, mediante compuestos de ^{11}C , en las inmediaciones de la instalación.

RADIOISÓTOPOS A PARTIR DE DEUTERONES

Los criterios de viabilidad para dispositivos de producción de radioisótopos de uso médico a partir de neutrones en la instalación IFMIF-DONES, están definidos en la referencia [8] del proyecto DONES EVO [4]. A partir de ellos, se ha desarrollado el diseño conceptual de dispositivos con ese propósito, cuyos resultados detallados están en la referencia [9], incluyendo el correspondiente análisis desde el punto de vista de la seguridad nuclear.

Las tres opciones cuyo concepto se ha desarrollado son:

- **Opción A:** Tubo fijo de acceso lateral a la *Test Cell* (TC) con dispositivo mecánico de transporte de muestras. Responde a la siguiente configuración (**Figura 7**).
- **Opción B:** Módulo compatible con el sistema neumático (tipo *Rabbit*) actualmente previsto para el sistema STUMM (*Start Up Monitoring Module*) de la TC [10].
- **Opción C:** Tubo fijo de acceso lateral a la TC con dispositivo de transporte de muestras tipo neumático. Su configuración es la siguiente (**Figura 8**).

A continuación, se profundiza en los radioisótopos de uso médico más utilizados. El más demandado es el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, empleado en el 86% de los procedimientos de medicina nuclear, con 30 millones de procedimientos anuales en el mundo. El $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se obtiene del decaimiento beta del ^{99}Mo que, a su vez, se produce a partir del ^{100}Mo por irradiación de

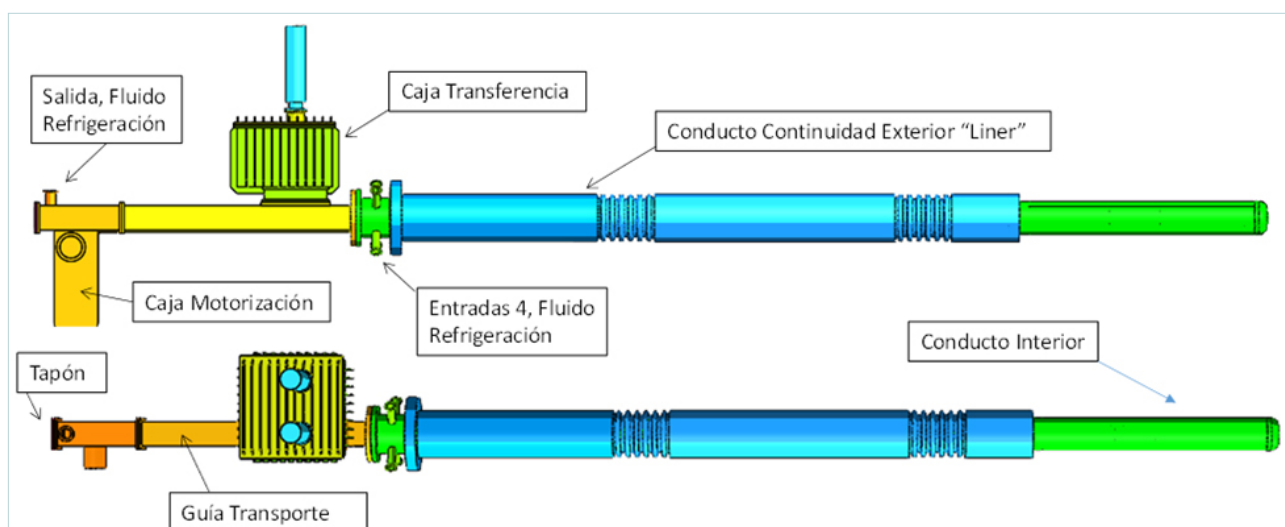


Figura 7. Planta y alzado del dispositivo de transferencia de muestras según la Opción A de diseño.

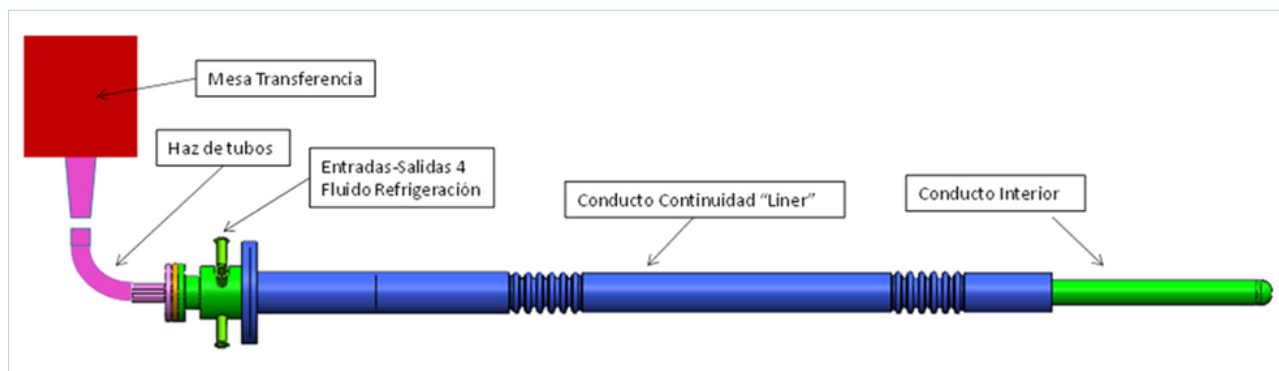


Figura 8. Representación en planta del dispositivo de transferencia de muestras según la Opción C de diseño.

neutrones de más de 7MeV, obtenibles en el acelerador IFMIF-DONES. Éste es el proceso original para el que se han diseñado los dispositivos anteriores.

En la referencia [11] se incluyen cálculos de producción de ^{99}Mo en estos dispositivos, a partir de los neutrones disponibles en IFMIF-DONES. Los resultados son:

Opción de diseño A: producción promedio de 69,8 TBq de ^{99}Mo por semana (**abastecimiento a una media de 350 hospitales semanalmente**).

Opción de diseño C: producción promedio de 18,51 TBq de ^{99}Mo por semana (**abastecimiento a una media de 93 hospitales semanalmente**).

Con el objeto de maximizar la viabilidad de los dispositivos de producción de radioisótopos de uso médico descritos, en la referencia [12] se analiza la viabilidad de producir otros radioisótopos, diferentes del ^{99}Mo , a partir de los neutrones disponibles en el acelerador IFMIF-DONES y, por lo tanto, en estos mismos dispositivos.

De entre esos otros radioisótopos generables con neutrones, cabe destacar el ^{177}Lu (diagnóstico y terapia del cáncer): a partir de un blanco de Yb_2O_3 enriquecido en ^{176}Yb podría obtenerse en la Placa 1 (primera de las cuatro que conforman la muestra) de la opción de diseño A, hasta 2374 GBq (**320 tratamientos semanalmente**).

DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA, SIGUIENTES PASOS

En el proyecto DONES EVO [4] se demostró, de forma teórica, la viabilidad de la producción de radioisótopos de interés médico en la infraestructura IFMIF-DONES. Partiendo del punto en el que quedó el proyecto, se describen a continuación los siguientes pasos a dar para avanzar en la consecución de esta infraestructura como complemento de la producción actual, ante la potencial futura escasez en el suministro de radioisótopos:

Avanzar en los diseños de sistemas de producción de radioisótopos: tras la obtención de diseños conceptuales de dispositivos de producción, tanto con neutrones como con deuterones, el siguiente paso sería la producción de diseños más avanzados de prototipos que puedan participar en ensayos con irradiación.

Diseño de porta muestras a irradiar: no menos importante que los propios dispositivos que facilitan la irradiación, son las muestras que contengan las especies precursoras y alberguen los radioisótopos de

interés generados tras la irradiación, cuyo diseño debe ser definido.

Radioquímica de las muestras: permitirá el diseño de las muestras desde la perspectiva de su composición química, incluyendo el análisis de la gestión de los radioisótopos de interés médico a producir y de los contaminantes que se generan, avanzando en los procesos para tratarlos.

Logística interna de las muestras irradiadas: los periodos de semidesintegración de los radioisótopos producidos condicionan y hacen que la logística de transporte permita su aplicación efectiva al paciente. Por ejemplo, el ^{99}Mo tiene un periodo de semidesintegración de 66h, para decaer a $^{99\text{m}}\text{Tc}$, que pasa a ^{99}Tc en 6,01 h, durante las que emite el fotón utilizado en la técnica de diagnóstico SPECT (*Single Photon Emission Tomography*).

Fabricación de prototipos: utilizando los diseños más avanzados, se fabricarían los correspondientes prototipos de dispositivos de producción de radioisótopos, con el fin de disponer del material necesario para los posteriores ensayos bajo condiciones de irradiación real, tanto con neutrones como con deuterones, similar a la que se produciría en IFMIF-DONES.

Validación de estimaciones de producción con resultados de experimentos de irradiación: gracias al proyecto DONES EVO, se dispone de estimaciones teóricas de producción de los principales radioisótopos de interés médico producibles, tanto con neutrones como con deuterones. Por lo tanto, es el momento de validar esos cálculos mediante experimentos de irradiación real de muestras, que se ajusten a los cálculos estimativos realizados.

Con este planteamiento, quedaría todo preparado para considerar los dispositivos de producción de radioisótopos en IFMIF-DONES, finalizando así el camino emprendido con el proyecto DONES EVO y contribuyendo de forma efectiva a la escasez en el suministro de radioisótopos de interés médico hoy en día más demandados y otros, más novedosos y esperanzadores.

CONCLUSIONES

La energía nuclear es fundamental para la producción de radioisótopos de interés médico, siendo una realidad en el caso de la energía de fisión y una esperanzadora promesa, en el caso de la energía de fusión.

Los estudios recientes para demostrar la viabilidad de la energía de fusión como fuente complementaria de producción [4], tomando como referencia el acelerador de partículas IFMIF-DONES, aseguran lo siguiente:

La infraestructura IFMIF-DONES generará flujos de partículas de características suficientes para la producción de radioisótopos de uso médico, con una relación coste/beneficio suficientemente buena como para superar todos los retos tecnológicos planteados.

Se han desarrollado diseños conceptuales de dispositivos para la generación de radioisótopos y estimado sus producciones: IFMIF-DONES podría ser un productor a mediana escala con una producción de 69,80 TBq (^{99}Mo)/semana, lo que equivale al abastecimiento de 350 hospitales semanalmente y posibilitaría abastecer a países vecinos [13] con el radioisótopo más demandado.

REFERENCIAS

- [1] *European Nuclear Society, The Medical Isotope Crisis*. <https://www.euronuclear.org/download/the-medical-isotope-crisis/>
- [2] *European Observatory on the supply of medical radioisotopes*, https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2021-09/radioisotopes_observatory_mission.pdf
- [3] *International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA Activities to Help Ensure the Supply of Medical Isotopes*, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Newsletters/NEFW-04-03.pdf>
- [4] M. Weber, N. Ballesteros, A. Echevarría y otros, "DONES EVO: Risk mitigation for the IFMIF-DONES facility", Science Direct, 2024.
- [5] I. Porras, J. Praena, F. Arias de Saavedra, A. Roldán, "Sondeo de Radioisótopos de Interés Médico Producibles con Deuterones", Entregable de Proyecto E2.1, UGR, 2022.
- [6] I. Porras, J. Praena, F. Arias de Saavedra, A. Roldán, M.E. López-Melero, "Informe Técnico Sobre Dispositivo y Producción de Radioisótopos PET en IFMIF-DONES a 5 MeV", Entregable de Proyecto E2.2, UGR, 2022.
- [7] I. Porras, J. Praena, F. Arias de Saavedra, A. Roldán, M.E. López-Melero, "Diseños de Prototipos de Blancos de Producción de Radioisótopos con deuterones: blancos para Radioisótopos PET", Entregable de Proyecto E2.4-1, UGR, 2023.
- [8] F. Mota, J. Praena, I. Porras, M.I. Ortiz, "Producción de radioisótopos en la instalación IFMIF-DONES con fines médicos (diagnóstico y tratamiento)", Entregable conjunto T3.1.1 (CIEMAT) y E1.1 (UGR), 2022.
- [9] M. Alcantud, N. Ballester, E. Fernández, "Diseño Conceptual del Sistema de Producción de Radio-Isótopos con Fines Médicos", 092-514-E-A40-00001 (EAI), Ed. 3, 2023.
- [10] U. Wiłcek, A. Kurowski, J. Kotuła, D. Bernardi, S. Becerril, J. Castellanos, F. Martín-Fuertes, M. García, A. Díez, A. Ibarra, "System Design Description Document for the IFMIF-DONES Start-Up Monitoring Module (STUMM)", EUROfusion WPENS Report EFDA_D_2N6MBJ, Ed. 3.0, May 2023.
- [11] J.I. Ortiz, F. Mota, "Producción de radioisótopos en la instalación IFMIF-DONES con fines médicos (diagnóstico y tratamiento). Estudio de Sensibilidad", Entregable de Proyecto T3.1.2 (CIEMAT), 2023.
- [12] F. Arias de Saavedra, F. García Infantes, M.E. López-Melero, I. Porras, J. Praena, A. Roldán, "Informe Detallado sobre la Producción de ^{177}Lu y otros Isótopos de Interés Distintos del ^{99}Mo con Neutrones", Entregable de Proyecto E1.3, UGR, 2024.
- [13] OECD/NEA "The Security of Supply of Medical Radioisotopes", OECD Publishing, Paris, 2023. ■