Fusión nuclear para la medicina de hoy y del futuro

P. Vallecorsa[1] **y M. Sztejnberg**[1,2]

[1] División Subcoordinación Instrumentación y Fuentes Radiantes, Departamento Coordinación BNCT, Gerencia de Investigación y Desarrollo en Aplicaciones Preclínicas y Clínicas, Gerencia de Aplicaciones Nucleares a la Salud, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Buenos Aires, Argentina
[2] Departamento de Física Médica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Favaloro, Buenos Aires, Argentina
*Correo Electrónico (autor de contacto): pablovallecorsa@cnea.gob.ar
Tópico: Fusión nuclear y aplicaciones nucleares a la salud

Resumen: El presente trabajo es un relevamiento de las tecnologías de fusión disponibles comercialmente y las posibilidades de aplicación en el ámbito de la salud. Los conocimientos sobre la fusión se remontan a principios del Siglo XX, pero, se necesitó mucha investigación y la convergencia de la tecnología para comenzar a dominar las caóticas condiciones de reacción. Las más estudiadas son las de deuterio-tritio (DT) y deuterio-deuterio (DD), con requerimientos nucleares relativamente bajos de energía y alta producción por volumen de combustible, 6 órdenes mayor que para el combustible fósil. La inversión privada se ha incrementado enormemente en los últimos años, con empresas emergentes disputándose el primer puesto en una carrera nuclear 2.0. Según la FIA el financiamiento total para empresas en fusión contabiliza 6,2 mil millones de dólares, siendo el 95% capital privado. De las más de 40 compañìas 25 se encuentran en EE.UU. La meta principal de la mayoría es lograr la producción de energía neta con fines comerciales, sin embargo, hay un número interesante que apuesta al campo de la salud. Las compañías como Shine Tech., Astral System, NSD-Fusion y Adelphi Tech. han abierto el mercado de las fuentes de neutrones compactos basadas en fusión. La producción de neutrones por fusión resulta interesante como fuente para aplicaciones en imagenología de neutrones, producción de radioisótopos o Terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) en cáncer. Los radioisótopos son producidos fundamentalmente en reactores de fisión o ciclotrones. El aumento de la demanda junto con el envejecimiento de las facilidades presenta un riesgo para el abastecimiento mundial. Contar con fuentes de intensidad suficiente compactas, seguras, ecológicas, económicas, y distribuibles regionalmente, permitiría establecer sistemas para motorizar plantas de producción o bien producción in situ en instalaciones hospitalarias. La BNCT involucra la irradiación de tumores con haces de neutrones, previa incorporación de un compuesto borado susceptible de captura neutrónica, de forma que decae en una partícula alfa, Li-7 y radiación gamma, efectores secundarios que dañan el ADN de la célula blanco. Los tumores tratados mediante BNCT son principalmente tumores superficiales o poco profundos como gliomas, cáncer de cabeza y cuello y melanoma. Una adaptación interesante es la utilizada en artritis reumatoide. Las imágenes de neutrones se han aplicado a muchos campos de estudio, dada la alta penetración de los neutrones a través de muchos metales y a su alto contraste con isótopos de bajo Z. La tomografía de neutrones complementa a la tomografía computarizada de rayos X, y es un método eficaz de investigación no destructiva para áreas como la medicina forense. Las fuentes de neutrones sintéticamente son dispositivos con una fuente iónica, un sistema acelerador y un blanco de fusión. Son comparablemente más pequeños y rentables que los grandes aceleradores o reactores, con flujos neutrónicos menores pero aceptables según las necesidades prácticas, pudiendo mejorarse a partir de nuevos diseños de moderadores de neutrones y la óptica del haz. Es aquí donde la vinculación entre la ciencia médica y las empresas resulta fundamental para adaptar la tecnología a las necesidades reales. En el marco del Proyecto BNCT se han estado realizando estudios computacionales de simulación sobre la posibilidad de producir haces de neutrones adecuados para su aplicación en BNCT de órgano explantado y de haz externo. Uno de los diseños más innovadores es una cavidad de irradiación neutrónica basada en fusión nuclear (CINBF), sistema que consta de un conjunto de fuentes de neutrones dispuestas alrededor de la muestra a ser irradiada. La aplicación de este tipo de adaptaciones podría extenderse a irradiaciones en otros marcos clínicos y de investigación y desarrollo como la activación intrahospitalaria de pequeñas cantidades de radiofármacos e irradiación de tejidos orgánicos con diferentes motivos; estudio del plasma en condiciones de fusión; ensayos de daños de materiales por irradiación tanto en el campo de fusión como en otros; y ensayos por activación neutrónica.

Abstract: This paper is a survey of commercially available fusion technologies and the possibilities of application in the health care field. Fusion knowledge dates back to the beginning of the 20th century, but it took much research and convergence of technology to begin to master the chaotic reaction conditions. The most studied are deuterium-tritium (DT) and deuterium-deuterium (DD), with relatively low nuclear energy requirements and high output per volume of fuel, 6 orders higher than for fossil fuel. Private investment has increased enormously in recent years, with emerging companies vying for the top spot in a nuclear 2.0 race. According to the FIA, total financing for fusion companies stands at $6.2 billion, 95% of which is private capital. Of the more than 40 companies, 25 are in the U.S. The main goal of most is to achieve net energy production for commercial purposes, however, there are an interesting number that are betting on the health field. Companies such as Shine Tech, Astral System, NSD-Fusion and Adelphi Tech have opened up the market for compact fusion-based neutron sources. The production of neutrons by fusion is of interest as a source for applications in neutron imaging, radioisotope production or Boron Neutron Capture Neutron Therapy (BNCT) in cancer. Radioisotopes are mainly produced in fission reactors or cyclotrons. Increasing demand coupled with aging facilities presents a risk to global supply. Having sources of sufficient intensity that are compact, safe, environmentally friendly, economical, and regionally distributable would allow the establishment of systems to power production plants or on-site production in hospital facilities. BNCT involves the irradiation of tumors with neutron beams, prior incorporation of a boron compound susceptible to neutron capture, so that it decays into an alpha particle, Li-7 and gamma radiation, secondary effectors that damage the DNA of the target cell. Tumors treated by BNCT are mainly superficial or shallow tumors such as gliomas, head and neck cancer and melanoma. An interesting adaptation is used in rheumatoid arthritis. Neutron imaging has been applied to many fields of study, given the high penetration of neutrons through many metals and their high contrast with low Z isotopes. Neutron tomography complements X-ray computed tomography, and is an effective method of nondestructive investigation for areas such as forensics. Synthetically, neutron generators are devices with an ion source, an accelerator system and a fusion target. They are comparably smaller and more cost-effective than large accelerators or reactors, with lower but acceptable neutron fluxes according to practical needs, and can be improved from new designs of neutron moderators and beam optics. This is where the link between medical science and business is essential to adapt the technology to real needs. The BNCT Project has been conducting computational simulation studies on the possibility of producing neutron beams suitable for application in explanted organ BNCT and external beam approaches. One of the most innovative designs is a nuclear fusion-based neutron irradiation cavity (CINBF), a system consisting of a set of neutron generators arranged around the sample to be irradiated. The application of this type of adaptations could be extended to irradiation in other clinical and R&D settings such as in-hospital activation of small quantities of radiopharmaceuticals and irradiation of organic tissues with different motifs; study of plasma under fusion conditions; tests of damage to materials by irradiation in the fusion field as well as in other fields; and tests by neutron activation.

La fusión nuclear

Una reacción de fusión supone cohesionar dos núcleos atómicos cargados positivamente venciendo la barrera coulombiana y haciendo entrar en acción la fuerza nuclear. Para lograrlo, las partículas que intervienen requieren típicamente energías por encima del *kilo-electrón-voltio*. Si además se busca tener una alta tasa de reacciones se debe alcanzar una numerosa población de partículas en simultáneo en condiciones de reaccionar. Esto lleva a la necesidad de llevar al material "combustible" a condiciones extremas de densidad- temperatura-tiempo, $nT\tau$, involucrando entornos donde la materia se encuentra en estado de plasma.

Las reacciones de fusión más estudiadas y tecnológicamente más accesibles al día de hoy son las que involucran a los isótopos del hidrógeno deuterio (D) y tritio (T):

$D + T \rightarrow He\ (3.52\ MeV) + n^0\ (14.06\ MeV)$

$D + D \rightarrow T\ (1.01\ MeV) + p^+\ (3.02\ MeV)\ [50\%]$

$D + D \rightarrow {}^3He\ (0.82\ MeV) + n^0\ (2.45\ MeV)\ [50\%]$

Para estos casos, la barrera coulombiana alcanza un valor de aproximadamente 400 keV aunque, por efecto túnel, las reacciones pueden ocurrir a energías menores. Estas pueden estimarse a través de la densidad de tasa de reacciones, r, para especies 1 y 2 en plasma con densidades de partículas n_1 y n_2 y parámetro de reacción[1] entre las dos especies con distribuciones de velocidades específicas, $<\sigma v>_{12}$ **[1,2,3]**:

$$r = \frac{1}{2} n_1 n_2 < \sigma v >_{12}$$

Para sistemas donde un haz de partículas con energía inicial E_0, carga q y corriente I, impacta sobre un blanco con densidad de partículas n, y sección eficaz σ se puede calcular la tasa de reacciones, R **[2,4,5]**:

$$R = \frac{I}{q} n \int_0^{E_0} dE \frac{\sigma}{dE/dx}$$

Teniendo en cuenta la sección eficaz de cada reacción, la reacción DT es para energía menores a 1 MeV una de las más favorecidas entre el grupo más típico de reacciones de fusión, según se puede observar en la **Fig. 1**. En la misma, se pueden observar curvas de secciones eficaces, σ, cuando se tiene un proyectil que impacta sobre un blanco fijo. También se pueden observar los parámetros de tasa de reacción para plasmas térmicos, $<\sigma v>$, que responde a la distribución estadística de Maxwell-Boltzmann.[2] Es de destacar que con energías de proyectil y temperaturas de plasma a partir de unos 10 keV ya se logran tasas de reacción DT sustanciales.

Un aspecto no menor de esta tecnología es que los materiales de reacción son fáciles de encontrar en la naturaleza, el deuterio se puede obtener del agua de mar con cierta facilidad,

---

[1] También conocida como parámetro de reactividad o tasa de reacción.

[2] Existen también otros escenarios para producir reacciones de fusión como los que involucran la interacción entre un haz de partículas y el plasma blanco. Además, los plasmas podrían presentarse en distribuciones no térmicas. En un plasma térmico la relación entre la energía cinética promedio por partícula, $<E>$, y la temperatura, T, está dada por $<E>=3k_BT/2$ mientras que la energía cinética más probable resulta $E_p=k_BT$; donde k_B es la constante de Boltzmann. Muchas veces, para considerar tanto distribuciones maxwellianas como no-maxwellianas (térmicas y no-térmicas) se utiliza el término "temperatura" asociado directamente a la relación $E=k_BT$. Así, "temperaturas" de 10 keV, por ejemplo, serían equivalentes a unos 116×10^6K.

empleando métodos de concentración y separación isotópica del hidrógeno-1. Y el tritio requiere un mayor esfuerzo, pero es posible producirlo mediante irradiación de neutrones sobre blancos de litio-6 y/o del inventario producido por otras instalaciones nucleares. Algo más a tener en cuenta, es que en la reacción no se producen residuos radiactivos de alta actividad o vida media larga, ni gases de efecto invernadero, por lo que se considera a la fusión una tecnología limpia.

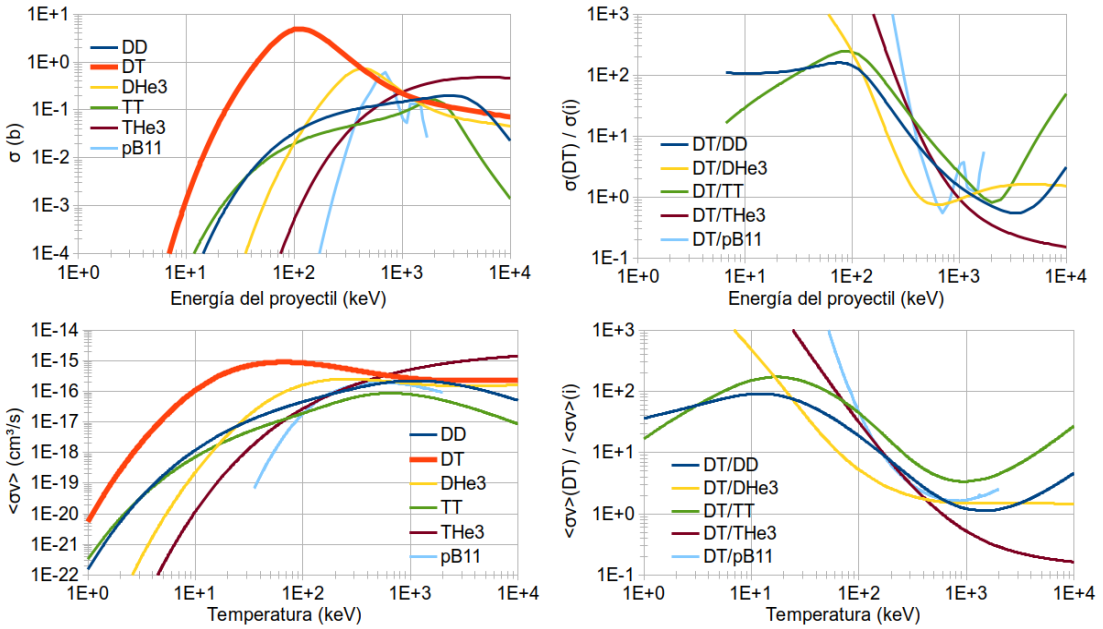

Fig. 1. Secciones eficaces (haz-blanco), σ, y parámetros de tasa de reacción de fusión (en plasma térmico), <σv>, mediante reacciones DD, DT, DHe-3, TT, THe-3. También se presentan los cocientes entre los valores para DT y los correspondientes a las otras reacciones (i). Para DT, los valores máximos aproximados de σ y <σv> son 4,94 b a una energía de 114 keV y $9{,}01\times10^{-16}$ cm³/s a una temperatura de 65 keV.

Desarrollos en fusión nuclear

La existencia de la fusión nuclear se ha propuesto en 1920 y estudiado a nivel mundial por más de 80 años, con avances y frenos en el proceso muchas veces ligados a una necesidad de financiamiento, siendo más constante desde la década de los 80's. En la actualidad y dada la concreción y convergencia de tecnologías, se ha despertado un renovado auge en la fusión a partir del surgimiento de nuevas empresas de base tecnológica. Según datos aportados este año por la IAEA a través de la Fusion Device Information System (FusDIS) hay computados 158 dispositivos de fusión, 14 de ellos en construcción y 44 planificados **[6]**. Es interesante observar que un 70 por ciento de ellos es de origen público. También es de destacar que la investigación y desarrollo está fuertemente localizada en el hemisferio norte, particularmente EEUU y Europa occidental, con presencia también del Este asiático. Sin embargo, existe una gran cantidad de proyectos de menor impacto desarrollados en otras partes del mundo.

Desde el punto de vista de la tecnología es interesante que, de esos 158 dispositivos al menos un 64 por ciento (101/158) utilizan el enfoque de Fusión por Confinamiento Magnético (MCF), un 8 por ciento (12/158) el enfoque de Fusión por Confinamiento Inercial (ICF), siendo el restante conceptos alternativos. Los dispositivos Tokamak son los desarrollos más representados en el área de los MCF, con 79 dispositivos, siendo ejemplos de ellos, el International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), el JT-60SA japonés y el Joint European Torus (JET) europeo, por citar algunos. También dentro de los MCF, otro concepto exitoso es el stellarator,

con ejemplos como el reactor alemán Wendelstein-7, el español TJ-II o el reactor estadounidense HIDRA.

En este punto, es importante destacar la investigación en Sudamérica, la cual cuenta con proyectos propios y colaboraciones activas en proyectos mundiales. Podemos mencionar en la Argentina, las investigaciones y desarrollos en física del plasma y plasma focus del Instituto de Física del plasma (INFIP-UBA-CONICET) y los grupos de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Entre estos últimos y de manera transversal, a través de diferentes divisiones, departamentos y gerencias, se pueden encontrar abordajes en física atómica y nuclear[3]; física de plasmas de fusión y reactores[4]; física de aceleradores y fusión mediante aceleradores[5]; barreras de permeación de hidrógeno en aceros estructurales para la "pared", metalurgia física de aceros previstos para la "primera pared" y otros componentes estructurales[6,7]; híbridos fusión-fisión y materiales aplicables a los reactores de fusión e híbridos[8]; producción de deuterio y tritio, compuestos de litio y reproductores de tritio[7,9]; producción de agua pesada[10]; plasma focus denso[11]; conceptos compactos y de alta factibilidad[7,12,13]; dispositivos por confinamiento inercial electrostático y aplicaciones de la fusión a la salud y la industria[11,12]. También en el área del plasma focus es importante sumar al grupo de Chile de Plasmas y Fusión Nuclear (CCHEN). En el plano de los reactores de fusión en la región, Brasil cuenta con tres tokamaks compactos, el mayor de ellos denominado TCABR, de origen suizo, rearmado e instalado en el Instituto de Física de la Universidad de São Paulo (IF-USP). Un segundo dispositivo es un modelo esférico denominado ETE del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Inpe) y, el tercer tokamak, denominado Nova, de origen japonés, se encuentra ubicado recientemente en la Universidad Federal de Espírito Santo (Ufes).

Como se ha mencionado con anterioridad, en los últimos años ha surgido una gran cantidad de empresas de base tecnológica en el área de la fusión. Al momento de escribir este documento, existían 43 empresas de fusión formalmente establecidas, que son parte de la Fusion Industry Association (FIA), duplicando la cantidad que había hace dos años y marcando así una tendencia creciente evidente desde inicios de la década de los 20's del nuevo siglo y que proyecta aumentos para los próximos años, dada la gran cantidad de proyectos que aún no ha

---

[3] División Colisiones Atómicas y Física de Superficie, Departamento Interacción de la Radiación con la Materia, Gerencia Física, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[4] Sección Fusión Nuclear y Física de Plasmas, Departamento Interacción de la Radiación con la Materia, Gerencia Física, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[5] Subgerencia Tecnología y Aplicaciones de Aceleradores, Gerencia Investigación y Aplicaciones, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[6] División Hidrógeno en Materiales, Departamento Estructura y Comportamiento, Gerencia Materiales, Gerencia de Área Energía Nuclear.

[7] División Transformaciones de Fase, Departamento Transformaciones y Propiedades, Gerencia Materiales, Gerencia de Área Energía Nuclear.

[8] Departamento Materiales Metálicos y Nanoestructurados, Gerencia Investigación Aplicada, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[9] Departamento Físico Química de Materiales, Gerencia Investigación Aplicada, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[10] Planta Industrial de Agua Pesada, Empresa Neuquina de Servicios de Ingeniería S.E.

[11] Departamento Plasmas Magnéticos, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación.

[12] División Instrumentación y Dosimetría, Subgerencia Instrumentación y Control, Gerencia de Área Energía Nuclear.

[13] División Subcoordinación Instrumentación y Fuentes Radiantes, Departamento Coordinación BNCT, Gerencia Investigación y Desarrollo en Aplicaciones Preclínicas y Clínicas, Gerencia de Área Aplicaciones Nucleares a la Salud.

dado el salto por fuera del ámbito de la investigación **[7]**. De las empresas establecidas, existe gran representación de los Estados Unidos (25/43) y de Europa (10/43).

El mercado de la fusión está vinculado principalmente al desarrollo energético, siendo mayormente la producción de electricidad, calor industrial y combustibles limpios. Sin embargo, hay un porcentaje no menor de desarrollos apuntados al área de la salud, con actores como Shine Technologies en la producción de radioisótopos de uso médico o TAE Technologies en su subsidiaria biotecnológica con foco en la Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT). Otras compañías que apuestan a un enfoque médico de la fusión son THEA Energy, Crossfield Fusion, Magneto Inertial Fusion Technologies y NK Labs, por nombrar algunas. Por fuera de FIA se puede mencionar, por ejemplo, Astral Systems. Es también remarcable, en términos más globales, el interés internacional en la utilización de reactores de fusión pequeños como fuentes de neutrones **[8,9]**.

En relación al financiamiento, este año se han superado los 6000 millones de dólares, esto implica que la inversión en el área de la fusión se ha multiplicado al menos en un factor de 100 desde principios de los años 2000. Las empresas que superan los 500 millones de dólares en inversión son Commonwealth Fusión Systems (2000 mdd), TAE Technologies (1200 mdd), Shine Technologies (700 mdd) y Helion Energy (577 mdd). Un dato no menos importante es que más del 95 por ciento de la inversión proviene a partir de capitales privados. En relación a estos inversores externos, es de destacar nombres importantes en la industria tecnológica como Bill Gates y Jeff Bezos, empresas multinacionales como Google, Sony, Toyota, Westinghouse; también la presencia de empresas del rubro petrolero, como Chevron, Eni, Cenovus Energy y Equinor, y empresas de capital de riesgo como Founders Fund, Khosla Ventures y Blackbird Ventures, por nombrar algunas.

Según el reporte anual de Research and Markets el valor del mercado de la fusión en 2023 es de un poco más de 300.000 millones de dólares con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 5.8 por ciento. Dado el impulso que está viviendo esta industria, se proyecta que alcance los 400.000 millones de dólares para 2027. Un aspecto muy interesante es que a la fecha ha generado casi 1000 puestos de trabajo altamente calificado, y se estima que ese número llegará a 4000 en el futuro cercano para cubrir puestos en toda la cadena de producción que involucra la puesta en marcha de la comercialización de las tecnologías.

Dispositivos basados en fusión nuclear

La producción de neutrones puede originarse a partir de varios tipos de reacciones de fusión, siendo en algunos casos un fenómeno indeseado, pero en otros una posibilidad de aprovechamiento y aplicación. Cada reacción tiene una energía y frecuencia de producción determinadas. Por ejemplo, en la reacción DT se generan neutrones de 14.06 MeV en el 100 por ciento de las reacciones, en tanto que para la reacción DD son de 2.45 MeV en el 50 por ciento de las reacciones.

La utilización de los neutrones puede vincularse a una gran cantidad de aplicaciones como la interrogación neutrónica, por ejemplo, análisis por activación neutrónica (retardado o instantáneo, DGNAA o PGNAA), radiografía o tomografía. También, puede llevarse a aplicaciones en el ámbito de la salud como con la Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT) o en la producción de radioisótopos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades no transmisibles como el cáncer o enfermedades cerebrales y coronarias. Existen diversas fuentes

de neutrones como los reactores de fisión, las fuentes de fisión espontánea o las fuentes de espalación. Es de destacar que la aplicación de estas partículas está fuertemente vinculada a las distribuciones de energía y flujo de la fuente que los provee.

En este documento nos centraremos en las denominadas fuentes de neutrones basadas en fusión (FNF), relativamente pequeñas. Involucran dispositivos que pueden ser portátiles o fácilmente trasladables, capaces de generar neutrones a partir de iones con energías de decenas a cientos de keV, con un rango de flujo neutrónico entre los 10^6 y 10^{10} n/s. Para producir establemente reacciones de fusión entre los 10^{10} y 10^{13} n/s sistemas algo más complejos y se requieren fuentes de alimentación de 100 a 500 kV. Esta familia de dispositivos, que suele considerarse dentro del amplio abanico de las fuentes de neutrones basadas en aceleradores (CANS, por sus siglas en inglés)[10], son una opción económica y versátil para obtener neutrones, aunque con prestaciones más limitadas, en comparación a los costosos aceleradores de mayor tamaño o los reactores de fisión complejos de mantener y operar, para una variedad de aplicaciones que se adecúan al flujo y la energía de las partículas que brindan estas fuentes. Particularmente, son sistemas que permiten el reemplazo de fuentes radiactivas y costosas como las de Cf-252. La **Tabla 1** muestra una resumida comparación de los dispositivos FNF que se analizan a continuación, dentro del universo de los CANS.

Tabla 1. Comparación de fuentes de neutrones basadas en fusión.

Tipo de dispositivo	**CANS**		
	Generadores de Neutrones		**Aceleradores Compactos**
	Fusores (IEC)	**Aceleradores Ultra compactos**	
Energía del proyectil [keV]	10-100	< 100	300
Tasa de producción [n/s]	< 10^8 (DD)	< 10^9(DD)	10^{11} (DD)
	< 10^{10} (DT)	< 10^{11} (DT)	10^{13} (DT)
Tipo de blanco	gas-plasma	sólido	gas o sólido
Tamaño [m]	1	< 1	4-5
Precio [MDD]*	0.1-0.6	0.05-0.5	1.0-3.0

*MDD: millones de dólares estadounidenses

Generadores de neutrones

Los generadores de neutrones son un grupo de fuentes neutrónicas de pequeño tamaño, en escala del metro (o menores), fácilmente ubicables en una mesada de trabajo, que agrupa a dispositivos de fusión basados en el confinamiento inercial electrostático (IEC, por sus siglas en inglés) y a aceleradores de partículas ultra compactos.

La tecnología basada en IEC representa un concepto madurado de la idea original del fusor que se remonta a la década de 1960. Consisten en acelerar iones para concentrarlos dentro de una cavidad con gas-plasma confinado. Una de las principales ventajas de estos dispositivos es su configuración simple y fácil manejo; el rendimiento de la producción de neutrones se puede mejorar principalmente aumentando la potencia de entrada, la cual está determinada por su relación de distancia, tensiones aplicadas y presiones de las partículas del gas-plasma. Dos de las geometrías más estudiadas en el campo del IEC son la geometría esférica más fiel a la idea del

fusor original, y la geometría cilíndrica la cual determina una fuente de irradiación lineal. Para esta última, la configuración más sencilla consiste en una cámara de vacío de aproximadamente 10 cm de diámetro y unos 60 cm de longitud, que contiene un cátodo interno en forma de grilla tubular cilíndrica, un ánodo cilíndrico externo y un conjunto de reflectores anódicos cóncavos circulares (transversales). Las reacciones de fusión se producen por el movimiento oscilante que se genera en la población de iones al desplazarse entre el cátodo y el ánodo. Se pueden conseguir así producciones de neutrones de 10^8 n/s para la reacción DD y de 10^{10} n/s para la reacción DT. Uno de los modelos más eficientes de esta tecnología fue desarrollado por John Sved, ya fallecido, cuya tecnología fue adoptada por la empresa NSD-Gradel-Fusion. Estos dispositivos son una fuente industrial de larga duración y bajo coste de mantenimiento para distintos tipos de interrogación neutrónica y, particularmente, considerando ensayos no destructivos.

La utilización de *aceleradores ultra-compactos* se basa en acelerar partículas en distancias de pocas decenas de centímetros. Constan simplificadamente de una fuente de iones, elementos ópticos para el haz de iones y un blanco, confinados en un tubo con alto vacío. A los más pequeños y simples se los conoce como tubos neutrónicos. Es posible utilizar deuterones o tritones como iones a acelerar, que impactan sobre blancos con deuterio y/o tritio en sustrato de estado sólido. Existe una amplia variedad de empresas que comercializan estos dispositivos como Thermo Fisher Scientific, Schlumberger y Adelphi en Estados Unidos, la francesa EADS Sodern y VNIIA de Rusia. Los rendimientos de neutrones alcanzados son de 10^6 a 10^8 n/s, lo cual restringe el rango de aplicaciones. Son muy utilizadas en análisis de composición y prospección en la industria nuclear, petrolera, minera y la industria armamentística, así como también en investigación y educación. Los modos de operación disponibles son continuo o pulsado, ajustados a la funcionalidad. Estos dispositivos funcionan con tensiones de aceleración de iones de entre 70 kV y 150 kV.

Aceleradores compactos

Existen desarrollos con mecanismos de aceleración ligeramente mayores, pudiendo tener en promedio unos 4 o 5 metros de longitud. Estos dejan de ser ultra-compactos pero siguen dentro de la familia de CANS. Las mayores energías de aceleración y corrientes de haz permiten tasas de producción e intensidad de neutrones mayores. Estos dispositivos han abierto un nuevo mercado en la generación de neutrones dadas estas características. Los rendimientos de neutrones alcanzados son sustanciales, logrando valores máximos de entre 10^{10} a 10^{13} n/s, lo que amplía el rango de aplicaciones, como la radiografía neutrónica o la producción de radioisótopos. Se especula que con ciertas mejoras en los rendimientos se llegaría a intensidades con niveles similares a los de pequeñas fuentes de espalación o reactores de fisión para investigación y producción, pero con una fracción de los costos, sin la dificultad del licenciamiento ni regulaciones complejas y con tamaños que permiten ubicarlos en una habitación. Una de las empresas más destacadas que desarrolla este tipo de dispositivos es la estadounidense Phoenix Nuclear Labs, fundada en 2005 con sede en Wisconsin, hoy en día cobijada por Shine Technologies. Han desarrollado diferentes aceleradores electrostáticos que producen neutrones a partir de la reacción DD o DT. La utilización de blancos gaseosos en lugar de sólidos, ha permitido aumentar las producciones de neutrones a 10^{11} n/s para la reacción DD y de 10^{13} n/s para la reacción DT. Estos sistemas utilizan aceleraciones de 300 kV y haces de 50 mA, aproximadamente.

Una mención destacable, es el desarrollo de acelerador de cuadrupolo electrostático desarrollado por la CNEA en el grupo liderado por Andrés Kreiner[14]. Cuentan con 3 desarrollos con potenciales de aceleración diferentes 240 kV, 720 kV y 1,45 MV, este último en construcción. Este último dispositivo, como una extensión de los primeros, está pensado para utilizar las reacciones de berilio o carbono irradiado por deuterones para la generación de neutrones para BNCT. Sin embargo, ya el primero de los diseños con 240 kV tiene la posibilidad de utilizarse para producir reacciones de fusión por DD o DT. A finales de 2022, se ha completado la transferencia de tecnología al instituto KIRAMS de Corea del Sur, donde se estará utilizando en el desarrollo de una facilidad BNCT.

Otro desarrollo emergente y con un gran potencial como FNFs es el sistema de fusión por confinamiento reticular (LCF, por sus siglas en inglés) que está desarrollando la empresa Astral Systems. Este diseño es un derivado del sistema IEC desarrollado por J. Sved potenciado por la aplicación de LCF. Éste es un proceso validado en 2021 por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los EEUU (NASA). La matriz reticular permite lograr mayores densidades de combustible, beneficiando las reacciones de fusión, reduciendo la energía necesaria para superar la barrera coulombiana y las temperaturas necesarias para la reacción.

Aplicaciones de la fusión nuclear en el ámbito de la salud

Radiosisótopos

Los radioisótopos son fundamentales en la industria de la salud, sirviendo tanto para el diagnóstico (SPECT o PET) como a nivel terapéutico a través de irradiación externa o interna con fuentes radiactivas. Existe una dependencia muy grande hacia los reactores de fisión experimentales y centrales nucleares, en crisis en muchos lugares del mundo; la escasez de estos insumos implicaría directamente la pérdida de vidas. Por ello es importante la búsqueda de alternativas a su producción, en este punto una opción atractiva son las FNF para aquellos producidos por neutrones o incluso protones. En este sentido, dada una fuente de neutrones de 14 MeV, es posible generarlos a través de reacciones neutrónicas del tipo (n, 2n), (n, α), (n, p), de esta forma es posible producir radioisótopos para SPECT como Tc-99m, emisores beta como Lu-177, Y-90, I-131, Ho-166, Re-188, Tb-161, emisores para PET, como N-13, F-18, Sc-44, Ga-68, Cu-64, Zr-89, y emisores alfa como Ac-225. También son posibles las reacciones protónicas utilizando fuentes que generen protones de 14,67 MeV utilizando la reacción d(3He, p)4He. Este tipo de reacción abre también la posibilidad para la producción de emisores de positrones.

La empresa Phoenix Nuclear Labs (en vínculo con Shine Technologies) ha desarrollado una FNF para producir radioisótopos a partir de activación neutrónica directa o mediante la fisión inducida por neutrones sobre arreglos subcríticos. Actualmente cuentan con la facilidad de producción de dos radioisótopos, el Mo-99 y el Lu-177. Este 2023 han abierto una nueva instalación en su sede central de Wisconsin, con una capacidad de producción inicial de 100,000 dosis de Lu-177 por año, con la capacidad de expandir aún más la capacidad de producción a 200,000 dosis por año en el futuro, de forma que se transformaría en la principal empresa productora de este insumo en EEUU. En cuanto al Mo-99 se planea una producción de 8000 Ci por semana (a seis días de retiro).

[14] Subgerencia Tecnología y Aplicaciones de Aceleradores, Gerencia Investigación y Aplicaciones, Gerencia de Área Investigación, Desarrollo e Innovación, Comisión Nacional de Energía Atómica.

Interrogación neutrónica

La interrogación neutrónica permite "observar" y "caracterizar" estructuras internas de los materiales del tamaño de 0,01 a 100 nm. Utilizada así en estudios de mecanismos moleculares, estructuras de proteínas e interacción complejas como ADN-ARN, proteínas de membranas, así como también la administración de drogas. Para estas determinaciones se utilizan los principios de la difracción, dispersión de ángulos pequeños y la reflectometría. Las imágenes de neutrones se han aplicado a muchos campos de estudio, dada la alta penetración de los neutrones a través de muchos metales y a su alto contraste con isótopos de bajo Z. La tomografía de neutrones complementa a la tomografía computarizada de rayos X, y es un método eficaz de investigación no destructiva para áreas como la medicina forense.

BNCT

La Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT) involucra la irradiación de tumores con haces de neutrones, previa incorporación de un compuesto borado susceptible de captura neutrónica, que reacciona y decae en una partícula alfa, Li-7 y radiación gamma, que dañan el ADN y otras estructuras sensibles de la célula blanco[11]. Los tumores tratados mediante BNCT son principalmente tumores superficiales o poco profundos como gliomas, cáncer de cabeza y cuello y melanoma. Una adaptación interesante es la utilizada en artritis reumatoide. Resulta importante el desarrollo de fuentes de neutrones que permitan su utilización más masiva y sobre todo en contextos hospitalarios, dado que de otra forma los pacientes deben trasladarse a facilidades asociadas a un reactor de fisión. En este punto, es importante destacar la necesidad de tasas de producción superiores a 10^{12} n/s y flujos térmicos de 10^{9} n/cm^{2}s en 1h de duración de la terapia para garantizar eficiencia de la terapia.

Las FNFs son opciones comparablemente más pequeños y rentables que los grandes aceleradores o reactores, con producciones menores pero aceptables según las necesidades prácticas, pudiendo mejorarse a partir de nuevos diseños de moderadores de neutrones y la óptica del haz. En este punto, y dada la versatilidad y modularidad de las FNF como los generadores de neutrones y CANS, es posible realizar arreglos de varias unidades de ellos para generar un dispositivo que cubra las necesidades operativas de una instalación BNCT.

En el marco del Proyecto BNCT de la CNEA se han estado realizando estudios computacionales de simulación sobre la posibilidad de producir a partir de fusión haces de neutrones adecuados para su aplicación en BNCT de órgano explantado en una cavidad de irradiación y de haz externo [12,13].

Uno de los diseños innovadores es una "cavidad de irradiación neutrónica basada en fusión nuclear" (CINBF), sistema que consta de un conjunto de fuentes de neutrones dispuestos alrededor de la muestra a ser irradiada. Se ha demostrado que para lograr tiempos de irradiación prácticos (1hr) se debería contar con producciones por encima de $6{\cdot}10^{11}$ n/s (**Fig. 2**). La aplicación de este tipo de adaptaciones podría extenderse a irradiaciones en otros marcos clínicos y pre-clínicos y de investigación y desarrollo como la activación intrahospitalaria de pequeñas cantidades de radiofármacos e irradiación de tejidos orgánicos con diferentes motivos; estudio del plasma en condiciones de fusión; ensayos de daños de materiales por irradiación tanto en el campo de fusión como en otros; y ensayos por activación neutrónica.

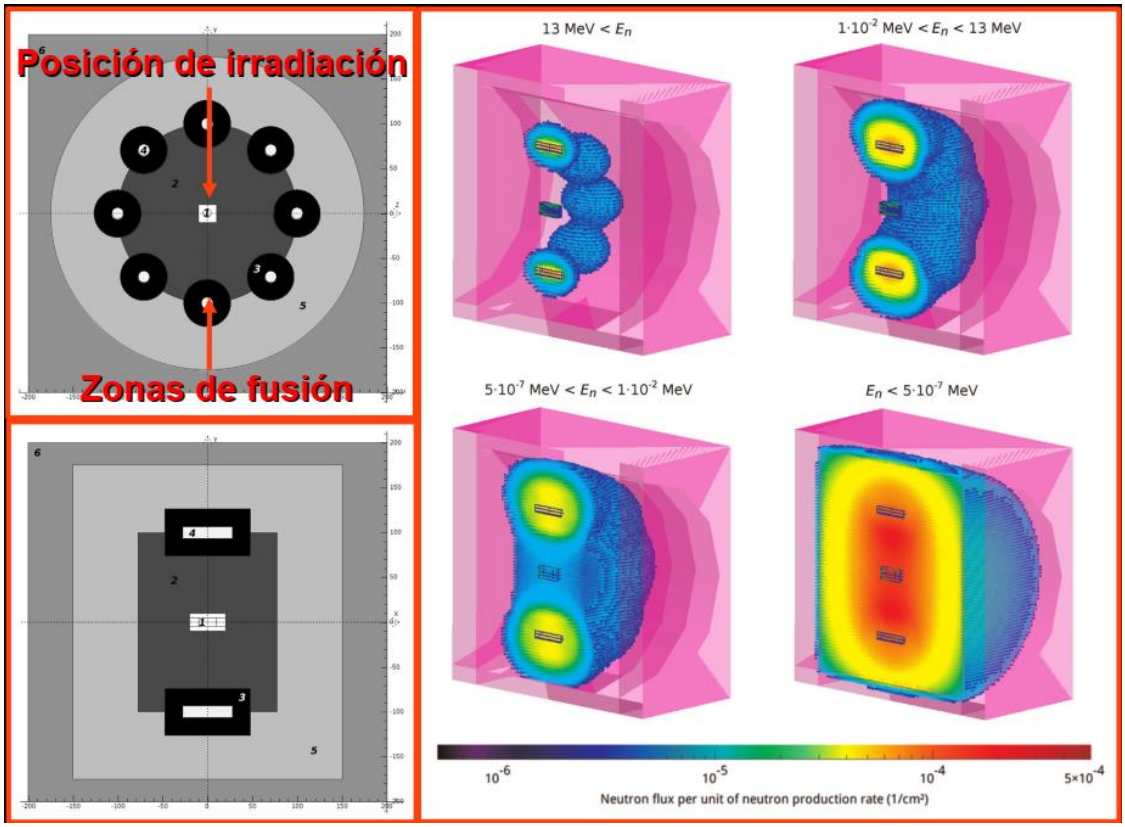

Fig. 2. Cavidad de Irradiación para BNCT o activación de pequeñas muestras (gráficos tomados y adaptados de **[12]**).

En línea con el mismo proyecto, se evaluó la posibilidad de contar con haces apropiados para un tratamiento de BNCT con haz externo. Para ello se consideraron sistemas de producción a partir de aceleradores electrostáticos compactos, con tensiones y corrientes de aproximadamente 300 kV y 50 mA, respectivamente, capaces de producir $5\cdot10^{13}$ n/s. A las fuentes, se las complementó diferentes alternativas de sistemas de acondicionamiento del haz (*beam shaping assembly*). Los resultados, en términos de factores de mérito del campo radiante en aire y tejido-equivalente, mostraron la posibilidad de llegar a configuraciones con semejanzas a referencias como la establecida por IAEA o de otras aplicaciones con reactores de fisión o aceleradores (**Fig. 3**).

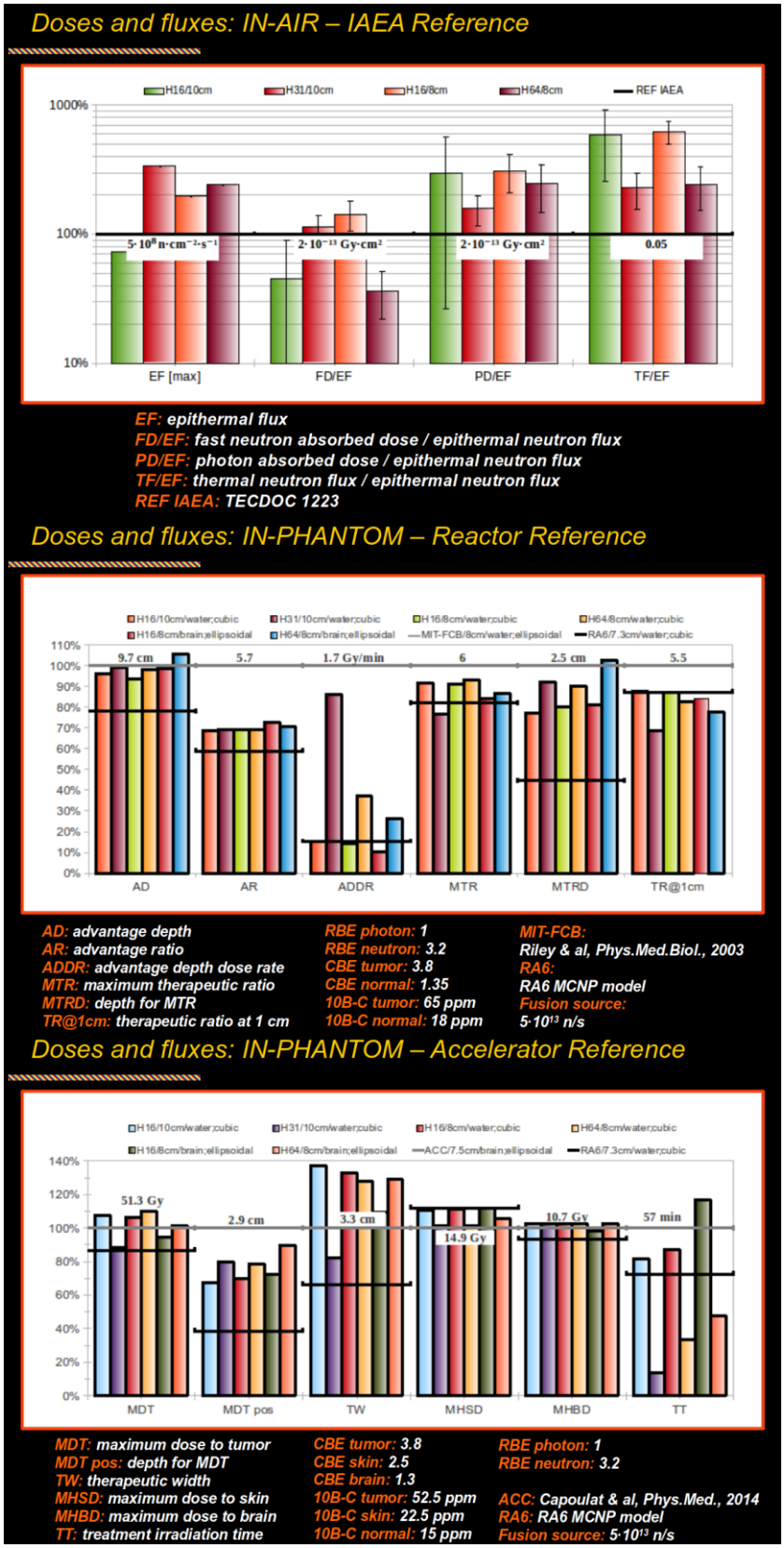

Fig. 3. Los resultados para estudio de facilidad basada en fusión para BNCT con haz externo. Se presentan de factores de mérito del campo radiante en aire y tejido-equivalente (tomado de **[13]**).

Conclusiones finales

La fusión nuclear está viviendo un auge renovado, visiblemente dado el aumento del financiamiento y el surgimiento de una gran cantidad de nuevas empresas de base tecnológica enfocadas en esta tecnología. Es importante comprender que la fusión ya es comercial al día de hoy, no desde el aspecto de la generación de energía aún, que es la aspiración más grande de esta tecnología, pero sí lo es en ciertas aplicaciones como es el caso de las fuentes de neutrones basadas en fusión (FNF). Las FNFs son comparablemente más pequeños y rentables que los grandes aceleradores o reactores, con flujos neutrónicos menores pero aceptables según las necesidades prácticas, pudiendo mejorarse a partir de nuevos diseños de moderadores de neutrones y la óptica del haz. Una aplicación directa son las técnicas de imágenes neutrónicas, muy utilizada en industrias como la petrolera, minera, entre otras.

Otro ejemplo de aplicación, es la producción de isótopos basada en fusión por activación neutrónica directa o inducida a partir de neutrones de fusión sobre arreglos subcríticos, tecnología adaptada por la empresa Shine Technologies que ha demostrado ser altamente competitiva respecto a otras tecnologías de producción de estos elementos.

La combinación de diferentes FNFs puede suponer una alternativa accesible económicamente, segura y versátil dada su simplicidad, modularidad y multipropósito, para la construcción de un sistema BNCT intrahospitalario. Esta opción podría incrementar significativamente la cantidad de instalaciones BNCT disponibles, aumentando los ensayos y evidencias clínicas necesarias para la validación y transferencia de estas soluciones tecnológicas al sector de la salud.

Finalmente, la carrera nuclear 2.0 ha iniciado y las fuentes compactas y económicas compatibles con instalaciones urbanas son de interés estratégico. La vinculación del capital privado y la investigación pública resultará indispensable para adaptar estas tecnologías a las necesidades reales del campo médico y alcanzar un futuro prometedor.

Referencias

[1] J.D. Huba, NRL Plasma Formulary, U.S. Naval Research Laboratory. 2013.

[2] G.H. Miley, H. Towner, N. Ivich, Fusion Cross Sections and Reactivities, Report COO-2218-17, Nuclear Engineering Program, University of Illinois. 1974.
https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/COO221817.xhtml

[3] T.J. Dolan. Fusion Research, Principles, Experiments and Technology. Pergamon Press. 2000.

[4] A.A. Burlon, T. del V. Roldán, A.J. Kreiner , D.M. Minsky , A.A. Valda. Nuclear reactions induced by deuterons and their applicability to skin tumor treatment through BNCT. Nucl.Inst.Meth.Phys.Res. 2008; 266:4903-4910. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.08.007

[5] M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker and J. Chang. Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. NIST Standard Reference Database 124. NIST. 2017. https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P

[6] IAEA. Fusion Device Information System, https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx. Agosto 2024.

[7] The global fusion industry in 2023: Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association; available at https://www.fusionindustryassociation.org/ (11 de Julio, 2023)

[8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Development of Steady State Compact Fusion Neutron Sources, IAEA-TECDOC-1998, IAEA, Vienna (2022). https://www.iaea.org/publications/15069/development-of-steady-state-compact-fusion-neutron-sources

[9] J. Li, S. Zheng. Feasibility Study to Byproduce Medical Radioisotopes in a Fusion Reactor. Molecules 2023; 28(5):2040. https://doi.org/10.3390/molecules28052040

[10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA-TECDOC-1981 Compact Accelerator Based Neutron Sources. IAEA, Vienna (2021). https://www.iaea.org/publications/14948/compact-accelerator-based-neutron-sources

[11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Boron Neutron Capture Therapy, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2023) https://www.iaea.org/publications/15339/advances-in-boron-neutron-capture-therapy

[12] M. Sztejnberg Gonçalves-Carralves, M. Miller, Neutron flux assessment of a neutron irradiation facility based on inertial electrostatic confinement fusion, App.Radiat.Isot. 2015; 106:95-100.
https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.06.017
[13] M. Sztejnberg, A.J. Kreiner. Fusion-based neutrons for BNCT: a discussion on current possibilities. VIII Young Researchers BNCT Meeting. ISNCT. Pavia, Italia. Septiembre de 2015.