

PÓSTER

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA AL ACELERADOR DE IFMIF-DONES

IVÁN PODADERA
 FERNANDO ARRANZ
 BEATRIZ BRAÑAS
 PABLO BRAVO
 JAVIER DÍAZ
 DANIEL IRIARTE
 MARÍA GUÍO
 JAVIER GUTIÉRREZ
 DAVID JIMÉNEZ-REY
 BIPIN KUMAR
 ROCÍO LÓPEZ
 ÁLVARO MARCHENA
 FRANCISCO MARTÍN-FUERTES
 JUAN CARLOS MARUGÁN
 JOAQUÍN MOLLA
 CRISTINA DE LA MORENA
 ANDRÉS MUÑOZ
 MANEL SANMARTÍ
 CONCEPCIÓN OLIVER
 CAYETANO PRIETO
 DAVID REGIDOR
 CARLOS ROSA
 DANIEL SÁNCHEZ
 FRANCISCO SIERRA
 CLAUDIO TORREGROSA
 RODRIGO VARELA
 MOISÉS WEBER
 ÁNGEL IBARRA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES
 ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y
 TECNOLÓGICAS (CIEMAT)

La instalación IFMIF-DONES ha sido identificada como esencial dentro de la hoja de ruta europea para conseguir un reactor de fusión comercial en los próximos años. Dicha instalación proporcionará la posibilidad de probar los materiales previstos para la construcción de los reactores de fusión en condiciones de trabajo similares. Para simular dichas condiciones, IFMIF-DONES irradiará los materiales con un flujo de neutrones creado mediante la interacción entre una cortina de litio líquido y una corriente continua de deuterones de alta energía e intensidad. Los deuterones serán producidos, acelerados y transportados hasta el blanco de litio mediante un acelerador lineal superconductor que se encuentra en el límite de la tecnología actual de este tipo de aceleradores. En el diseño del acelerador lineal, las instituciones y empresas españolas han participado como actores protagonistas en el diseño de diversos sistemas del acelerador de alto componente tecnológico, y en su integración entre ellos y con el resto de la instalación. El diseño de un sistema de RadioFrecuencia (RF) basado en amplificadores de estado sólido, las líneas de transporte de media y alta energía, el bloque de parada del haz durante el arranque, novedosos diagnósticos del haz para asegurar la integridad de la máquina y optimizarla, los sistemas auxiliares asociados (vacío, criogenia, refrigeración...) o sistemas de control y sincronización de todos los sistemas son las principales contribuciones actuales de España al acelerador. En la presente ponencia se desarrollarán dichas contribuciones a IFMIF-DONES como elementos tractores del sistema científico español en los próximos años.

INTRODUCCIÓN

El éxito de la producción comercial de electricidad basada en reacciones de fusión nuclear depende en gran medida de los resultados obtenidos por el proyecto internacional ITER, en primera instancia, y a continuación por el proyecto de reactor demostrador DEMO. Con el diseño actual, los materiales usados en la construcción de este último se someterán a importantes flujos de partículas que deberán ser soportados durante la vida de la máquina. Es necesario, por lo tanto, asegurar que los materiales de diseño serán capaces de soportar las cargas en operación. El tipo de irradiación y daño a los que serán sometidos dichos materiales no están disponibles actualmente en ningún otro dispositivo experimental. Por dicho motivo, desde hace ya unas cuantas décadas se propusieron varias alternativas para simular experimentalmente dicho comportamiento, que es esencial para asegurar el funcionamiento de los reactores comerciales. La alternativa más consensuada durante los últimos

años fue la de producir una irradiación similar mediante reacciones $\text{Li}(d, xn)$, en la que un haz de alta corriente de deuterio impactara sobre un blanco de litio con una energía de unos 40 MeV. El diseño de referencia consistía en realidad en dos aceleradores lineales de 125 mA cada uno, lo que representaba una deposición de potencia promedio en el blanco de 10 MW. Es el denominado proyecto *International Fusion Materials Irradiation Facility* (IFMIF).

Sin embargo, en los últimos años un cambio de diseño en el DEMO europeo, en el que se reducía el daño en los materiales, permitió proponer una nueva alternativa, en la que únicamente se usara un solo acelerador lineal de deuterio a 125 mA y 40 MeV (potencia promedio de 5 MW). A esta nueva propuesta se la denominó IFMIF-DONES (*DEMO-Oriented Neutron European Source*) y se incluyó como instalación de referencia en el Fusion European Roadmap y en el mapa de instalaciones ESFRI [1].

EL ACELERADOR DE PARTÍCULAS

El corazón de la instalación IFMIF-DONES es el acelerador lineal que proporciona la corriente y energía de partículas de deuterio al blanco de litio líquido (Figura 1). El acelerador se compone de diversos componentes principales: 1) una fuente de iones de deuterio de corriente continua de hasta 140 mA, que a su vez acelera el deuterio hasta 100 keV e inyecta el haz dentro del cuadrupolo de radiofrecuencia, 2) un cuadrupolo de radiofrecuencia (RFQ) que con una longitud de 10 m es capaz de acelerar las partículas de deuterio hasta 5 MeV y empaquetarlas en un tren continuo a 175 MHz, 3) una línea de transporte de media energía que conecta el RFQ con el acelerador superconductor y que es clave en la protección y funcionamiento del acelerador, 4) un conjunto de criomódulos que contienen cavidades resonantes superconductoras operando a 175 MHz, que se encargan de acelerar las partículas desde 5 MeV a la energía final de 40 MeV y 5) una línea de transporte de alta energía que envía las partículas desde el acelerador superconductor al blanco de litio, cuya principal particularidad es que debe proporcionar un perfil rectangular al blanco de litio para optimizar la producción de neutrones sobre las muestras a medir.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA

La contribución española durante el diseño de IFMIF-DONES (Figura 2) ha sido muy significativa, dando continuidad y consolidando la aportación tecnológica esencial durante el desarrollo del prototipo LIPAc [2,3,4]. CIEMAT coordina dicha contribución como instituto de contacto en España para el consorcio Eurofusion y como organismo tractor de otras iniciativas surgidas en el marco del diseño de DONES. Las principales líneas de trabajo son: la continuación en el diseño para DONES de aquellos sistemas en los que CIEMAT en colaboración con la industria española han sido responsables y claves durante LIPAc (como la MEBT, la

HEBT, los sistemas de RF o ciertos diagnósticos de haz), y el diseño de aquellos sistemas auxiliares necesarios para el funcionamiento del acelerador. Se ofrece una descripción más detallada de dichas contribuciones en los siguientes apartados.

Línea de Transporte de Media Energía

La Línea de Transporte de Media Energía, o MEBT por su acrónimo en inglés, se compone de un conjunto de cinco electroimanes focalizadores, combinados con correctores horizontales y verticales, dos conjuntos de palas móviles colimadoras del haz y dos cavidades resonantes para re-empaquetar los micropaquetes de partículas. Además, se incluyen una serie de diagnósticos para monitorizar las propiedades del haz a la salida de la primera gran etapa de aceleración, el RFQ: un monitor de corriente, monitores de posición y fase, y varios monitores de pérdidas del haz. El CIEMAT es el responsable del diseño de dicho sistema para DONES, además de haber sido el responsable del diseño y fabricación del prototipo a escala real fabricado para LIPAc [5]. La MEBT (Figura 3) representa un componente crítico para el funcionamiento del acelerador y un sistema complejo tanto a nivel global, debido a la densidad de componentes en apenas 2 m de línea, como a nivel particular, con imanes y cavidades resonantes de alto gradiente y componentes de alta disipación térmica. En la construcción del prototipo,

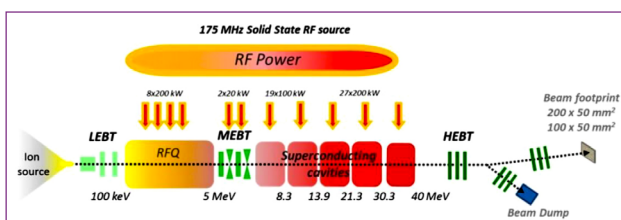


Figura 1. Esquema del acelerador de IFMIF-DONES.

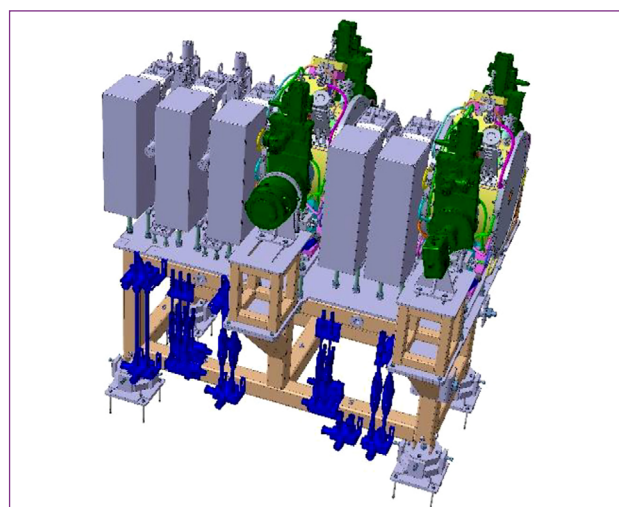


Figura 3. Modelo de la línea de media energía (MEBT) para IFMIF-DONES.

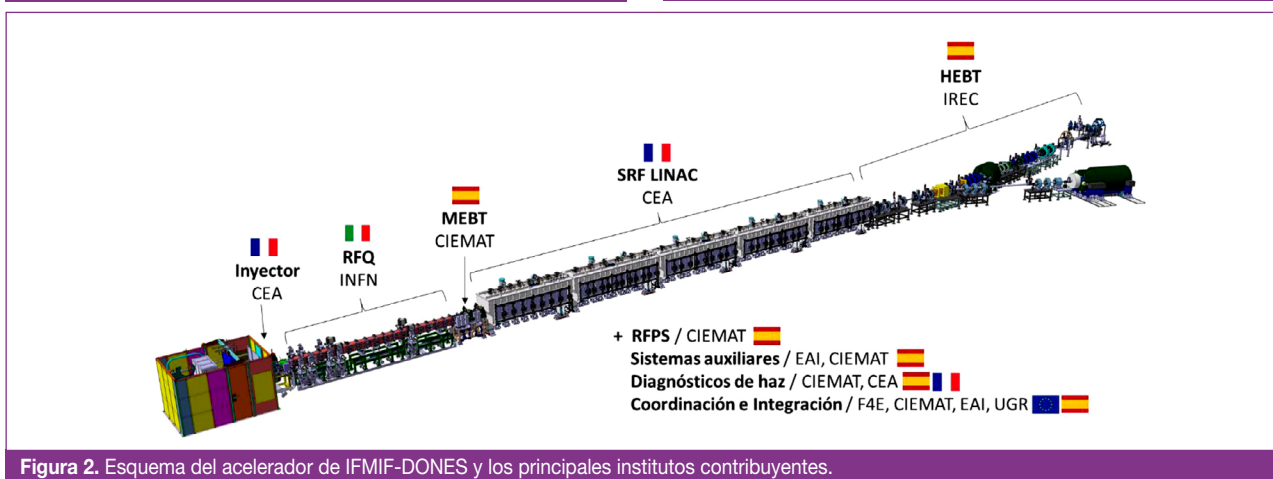


Figura 2. Esquema del acelerador de IFMIF-DONES y los principales institutos contribuyentes.

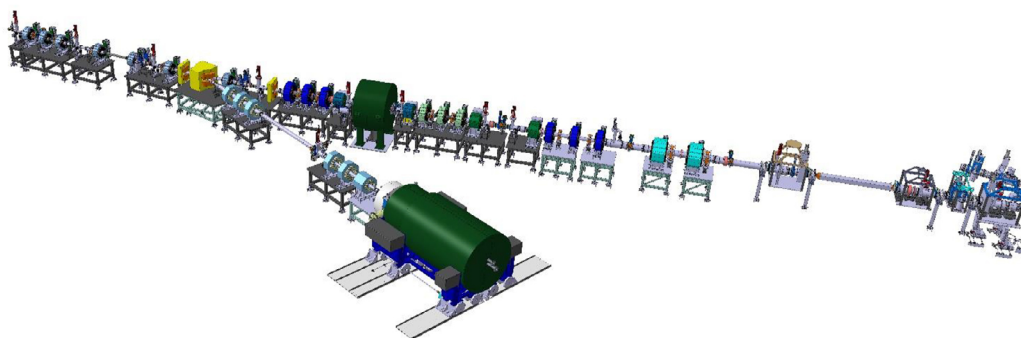


Figura 4. Modelo de la línea de alta energía (HEBT) para IFMIF-DONES.

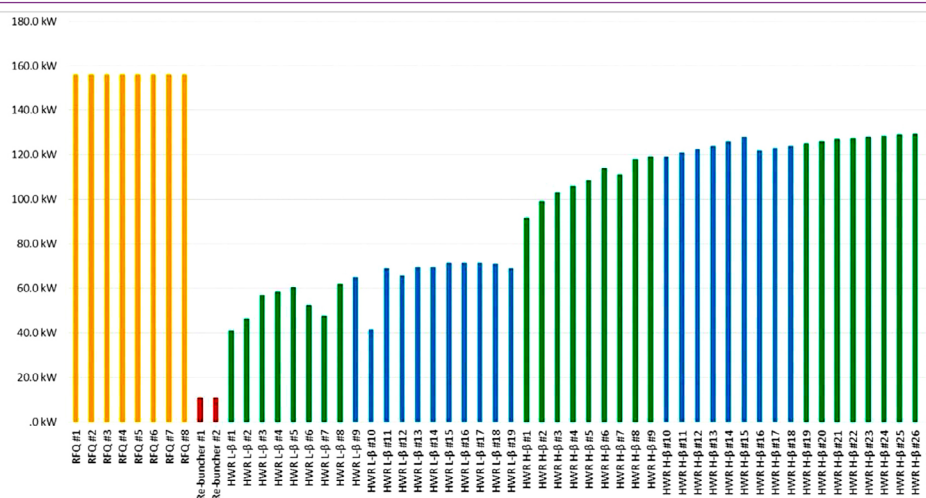


Figura 5. Requisitos de potencia a 175 MHz en cada una de las cadenas de radiofrecuencia.

la industria española tuvo una contribución esencial para el desarrollo del proyecto. Empresas como AVS -palas colimadoras-, ANTEC -electroimanes-, NEUREUS -fuentes de imanes cuadrupolares-, EGILE -cavidades resonantes- y TRINOS VACUUM PROJECTS -monitores de posición- fabricaron los prototipos que ahora se encuentran validados ya casi en su totalidad en LIPAc.

Línea de Transporte de Alta Energía

El sistema HEBT (Figura 4) es uno de los más importantes no solo del acelerador, sino de toda la instalación. Es el sistema encargado de transportar el haz desde la última etapa de aceleración, hasta el blanco de litio líquido, dándole la forma rectangular adecuada a los requisitos del blanco y de las muestras experimentales.

El diseño de la línea actual ha sido coordinado por IREC [6], integrando los requisitos de la línea diseñada mediante estudios y simulaciones de dinámica de haz por parte de CIEMAT [7,8], y basándose en la experiencia adquirida en el diseño y construcción de la línea HEBT para LIPAc [9]. Los electroimanes (dipolos, cuadrupolos, correctores, octupolos y dodecapolos) han sido diseñados por la empresa ELYTT. El diseño del bloque de parada es similar al diseñado por CIEMAT y fabricado íntegramente por la industria española para LIPAc [10], aunque en el caso de IFMIF-DONES los requisitos son manejar un haz de 5 MW en pulsado con una potencia media inferior al 1% (50 kW, con pulsos de hasta 2 ms y frecuencias de repetición de hasta 5 Hz).

La HEBT tiene varios puntos que complican su diseño y donde la contribución española está siendo esencial: 1) varios de los elementos, incluyendo todos los de la sala contigua al blanco de litio, la llamada *Target Interface Room*, deben ser diseñados para su manejo por manipulación remota, debido a las altas dosis residuales tras operación [11, 12]; 2) algunos de los componentes deben ser capaces de soportar las altas dosis absorbidas durante operación, con tasas de hasta ~100 Gy/h, lo cual complica ostensiblemente el diseño para la vida útil de la instalación de entre 20 y 30 años; 3) varios de los componentes, relacionados con el sistema de vacío, forman parte del sistema de seguridad contra accidentes causados por el blanco de litio líquido, lo cual aumenta las necesidades y complica el diseño de esos componentes [13].

Por último, señalar que una de las funcionalidades más importantes de la HEBT es la de proporcionar el perfil de haz adecuado al blanco de litio [14]. Para garantizar dicho propósito se han previsto una serie de diagnósticos del haz de partículas instalados a lo largo de la línea y para esta función particular en la sala TIR cercana al blanco. El diseño de dicho diagnóstico innovador es responsabilidad del CIEMAT y es continuación del diseño y fabricación de los diagnósticos que monitorizan el perfil de LIPAc de manera no interceptiva basados en la luz de fluorescencia. El diseño en IFMIF-DONES tiene que garantizar que el acelerador proporciona un perfil rectangular uniforme y estable a la zona del blanco. En el diseño actual, un monitor -basado en la medición de la emisión de luz debida a la interacción entre el haz de deu-

terones y el blanco- es clave en garantizar y optimizar la operación del acelerador [15].

Fuentes de Potencia de Radiofrecuencia

Desde el inicio del diseño de LIPAc [16], España tuvo el liderazgo en el diseño y fabricación del sistema de suministro de potencia de RF (RFPS) a las cavidades resonantes del acelerador. En LIPAc el sistema consistía en una serie de módulos de RF a 175 MHz basados en su mayoría en tetrodos con suministro de potencias promedio continuas de hasta 200 kW, a excepción de dos módulos de estado sólido de 20 kW para las cavidades re-buncher de la MEBT. Sin embargo, debido a la evolución de la tecnología y los exigentes requisitos de fiabilidad y disponibilidad de IFMIF-DONES en comparación con LIPAc, se decidió el uso de tecnologías basadas en estado sólido en todas las cadenas de RF, con una potencia máxima también de hasta 200 kW (Figura 5) [17].

La evolución e implantación de esta tecnología en los aceleradores lineales de hadrones ha crecido exponencialmente en los últimos años, sustituyendo a la basada en tubos de vacío en muchas instalaciones. Para el cumplimiento y optimización de los requisitos de la instalación en este campo, CIEMAT como responsable del sistema, en colaboración con BTESA y RYMSA, inició una línea de investigación cuyo propósito fue mejorar la eficiencia global del sistema, desarrollando para ello sistemas innovadores de combinación de potencia y amplificadores de estado sólido de alta eficiencia y disponibilidad. En esa línea, se han desarrollado ya varios prototipos tanto de los módulos de amplificación basados en transistores de estado sólido, como de la cavidad combinadora de potencia (Figura 6). En los últimos resultados experimentales en el Laboratorio de RF de CIEMAT, ubicado en las instalaciones de BTESA, la cavidad combinadora se validó a 24 kW en continua y a 100 kW en modo pulsado [18].



Figura 6. Imagen del prototipo de combinador para el sistema de RFPS.

Para el control de la inyección de potencia en las cavidades resonantes de radiofrecuencia, tanto en acondicionamiento como en operación, el diseño actual se basa en el sistema desarrollado y probado para LIPAc por el CIEMAT y la empresa SEVEN SOLUTIONS [19]. Se trata de un potente módulo de control rápido completamente digital, basado en FPGA y sincronización mediante White Rabbit, que ha permitido adaptarse con gran flexibilidad a los requisitos críticos en términos de lazos de control y protección de las cavidades resonantes de RF del acelerador DONES.

Sistemas Auxiliares

Por Sistemas Auxiliares del Acelerador de IFMIF-DONES entendemos un conjunto de subsistemas que dan servicio transversal al resto de sistemas del acelerador: la distribución de potencia eléctrica, la distribución de gases, la refrigeración por agua, la evacuación y producción de alto vacío en los componentes, y la refrigeración criogénica de los componentes del criomódulo. Hasta la fecha el diseño de estos sistemas ha sido liderado por EAI y se ha focalizado en la definición de los requisitos de cada sistema del acelerador, los interfaces y la implementación en la planta.

El diseño de detalle del subsistema de vacío se ha nutrido de la experiencia obtenida en LIPAc. Sin embargo, el escalamiento de requisitos para DONES, derivados principalmente de la integración de requisitos de seguridad, ha sugerido la puesta en marcha de nuevas actividades de prototipado de varios componentes. En concreto, la UGR y CIEMAT están liderando la construcción de un nuevo prototipo de la última sección del acelerador para la simulación de escenarios relacionados con la seguridad y el confinamiento del blanco por la entrada abrupta de contaminantes en el tubo de vacío.

CONCLUSIONES

La contribución española al diseño del acelerador IFMIF-DONES ha sido esencial. En la fase de construcción, España representará el principal contribuyente al proyecto IFMIF-DONES con una participación estimada de alrededor del 50 por ciento del total. El acelerador de IFMIF-DONES está compuesto de tecnologías críticas e innovadoras, consideradas dentro del estado del arte en los aceleradores de partículas, en las que la contribución española ha sido y es vital para ofrecer soluciones de diseño al acelerador, a la vez que ha servido y sirve de impulso de las tecnologías asociadas en el tejido industrial español.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se ha llevado a cabo dentro del marco del consorcio Eurofusion y ha recibido financiación por parte del programa de investigación y formación Euratom 2014-2018 y 2019-2020 bajo los acuerdos nº 870186 y 633053.

REFERENCIAS

- [1]. A. Ibarra et al., "The European approach to the fusion-like neutron source: the IFMIF-DONES project", Nucl. Fus., vol.59, no. 6, p. 065002, May 2019. doi:10.1088/1741-4326/ab0d57
- [2]. P. Cara et al., "The Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAC) Design Development under the European-Japa-

- nese Collaboration”, Proc. 7th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’16), Busan, Korea, May 2016, pp. 985–988. doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-MOPOY057
- [3]. H. Dzitko et al., “Status and future developments of Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)”, Fus.Eng. Design, vol. 168, p. 11261, July 2021. doi:10.1016/j.fusengdes.2021.112621
- [4]. J. Knaster et al., “The accomplishment of the Engineering Design Activities of IFMIF/EVEDA: The European-Japanese project towards a Li(d,xn) fusion relevant neutron source”, Nucl. Fus., vol. 55, no. 8, p. 086003, July 2015. doi:10.1088/0029-5515/55/8/086003
- [5]. I. Podadera et al., “Manufacturing, Assembly and Tests of the LIPAc Medium Energy Beam Transport Line (MEBT)”, Proc. 28th Linear Accelerator Conf. (LINAC’16), East Lansing, MI, USA, Sep. 2016, pp. 554–557. doi:10.18429/JACoW-LINAC2016-TUPLR041
- [6]. O. Nomen et al., “Preliminary design of HEBT of IFMIF-DONES”, Fus.Eng.Design, vol. 153, p. 111515, 2020. doi:10.1016/j.fusengdes.2020.111515
- [7]. C. Oliver, A. Ibarra, P. Cara, N. Chauvin, and A. Gallego, “Phase-Space Transformation for a Uniform Target Irradiation at DONES”, Proc. 28th Linear Accelerator Conf. (LINAC’16), East Lansing, MI, USA, Sep. 2016, pp. 424–426. doi:10.18429/JACoW-LINAC2016-TUPRC006
- [8]. C. Oliver et al., “Impact of the Magnet Alignment and Field Errors on the Output Uniform Beam at the DONES HEBT line”, Proc. 12th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC’21), Campinas, Brazil, May 2021, WEPAB259.
- [9]. B. Brañas et al., “Design, manufacturing and tests of the LIPAc high energy beam transport line”, Nucl. Fus. 61, 1, 2021. doi.org/10.1088/1741-4326/abbba1
- [10]. B. Brañas et al., “The LIPAc Beam Dump”, Fus. Eng. Design, 127, pp. 127-138, 2018. doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.12.018
- [11]. F. Arranz et al., “Remote Handling in the Accelerator Systems of DONES” IEEE Transactions on Plasma Science 48, 6, pp. 1743 - 1747. 2020. DOI: 10.1109/TPS.2020.2969262
- [12]. D. Sánchez-Herranz et al., “Design of the HEBT components inside TIR room of the IFMIF DONES facility”, Fus. Eng. Design, 168, p. 112636, 2021. doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112636
- [13]. F. Martín-Fuertes et al., “Integration of Safety in IFMIF-DONES Design”, Safety, vol. 5, no. 4, p. 74, 2019. doi:10.3390/safety50400745
- [14]. I. Podadera et al., “Beam Diagnostics for the Multi-MW High Energy Beam Transport Line of DONES”, in Proc. 8th Int. Beam Instrumentation Conf. (IBIC’19), Malmö, Sweden, Sep. 2019, pp. 200–204. doi:10.18429/JACoW-IBIC2019-MOPP042
- [15]. R. Varela, “New developments of high current beam profile monitors for ion accelerators applied to fusion material research”, tesis doctoral, UCM, Madrid, Nov. 2019. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/59735/1/T41924.pdf>
- [16]. P. Méndez et al., “LIPAc RF power system: design and main practical implementation issues”, Fus. Eng. Design, 165, 112226, 2021. doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112226
- [17]. D. Regidor et al., “IFMIF-DONES RF System”, Fus. Eng. Design, vol. 167, p. 112322, June 2021. doi:10.1016/j.fusengdes.2021.1123225
- [18]. C. de la Morena et al., “First validation experiments of the prototype solid state RF system for IFMIF-DONES”, in Fus. Eng. Design, vol. 168, p. 112396, July 2021. doi:10.1016/j.fusengdes.2021.1123965
- [19]. C. de la Morena et al., “Fully digital and White Rabbit synchronized Low Level RF System for LIPAc, IEEE Trans. Nucl. Sci., 65-1, p. 514-522, doi: 10.1109/TNS.2017.2780906 ■