FUSIÓN EN EL MIT: EL CAMINO DEL CAMPO MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDAD

Alcator C-Mod ha sido el único tokamak con divertor capaz de operar con campos magnéticos de hasta 8 Tesla y, dado su tamaño compacto, acceder regímenes de alta densidad de potencia. En su último día de operación en el 2016, Alcator C-Mod logró el récord mundial de presión en plasmas por confinamiento magnético, acercándose al objetivo de ITER. Tras este éxito y el cierre de Alcator C-Mod, el *Plasma Science and Fusion Center* (PSFC) del Instituto Tecnológico de Massachusetts está embarcado en un nuevo proyecto muy ambicioso: construir SPARC, un tokamak que produzca por primera vez energía neta por fusión. Gracias a la financiación y colaboración con la *startup* privada *Commonwealth Fusion Systems*, el PSFC está actualmente desarrollando las primeras bobinas para fusión con superconductores de alta temperatura. Recientes avances en esta tecnología de superconductores posibilitan el diseño de imanes de alto rendimiento que operen con campos magnéticos altos y dimensiones reducidas. Las nuevas bobinas serán usadas en SPARC para producir un campo magnético de 12 Tesla en el centro del plasma, permitiendo generar en una máquina compacta más energía que la consumida en calentar y mantener el plasma. SPARC será un tokamak con objetivos paralelos y complementarios a ITER: demostrar que el camino del campo magnético de alta intensidad y reactores compactos es viable para futuras plantas de fusión para producción de energía.

PABLO RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ

Doctor en Física de Plasmas en el Departamento de Ciencia e Ingeniería Nuclear

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS (MIT)

Ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Madrid, ingeniero mecánico por la Universidad de Drexel.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la fusión como fuente de energía cuenta con grandes ventajas, como el combustible prácticamente ilimitado, la ausencia de desechos radiactivos de alta duración y la supresión de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la fusión es intrínsecamente segura y su combustible (principalmente deuterio y litio) está en principio disponible en cualquier parte del mundo. Todo esto hace que se perfile como la candidata perfecta para contribuir al abastecimiento energético del planeta y paliar las consecuencias del cambio climático. La cuestión que uno debe plantearse entonces es... *¿cuándo llegará?*

Durante los últimos años se ha visto que el alto coste de las plantas de fusión (con una necesidad de inversión de capital inicial muy elevada) y su complejidad podrían frenar su desarrollo y uso extendido como fuente de energía. Véase como ejemplo paralelo el desarrollo de las plantas de fisión nuclear en Estados Unidos en los últimos años [1]. Desde los primeros experimentos con tokamaks (posiblemente el tipo de reactor de fusión más prometedor hasta la fecha) de los años sesenta, el tamaño de los experimentos de fusión ha ido aumentando, hasta llegar a ITER, el cual se encuentra en construcción en el sur de Francia. ITER se ha desarrollado como una colaboración de entre más de treinta naciones, y se ha descrito muchas veces como uno de los proyectos tecnológicos más complejos de la historia de la humanidad [2]. Pero, una vez ITER demuestre, entre otros objetivos, que es posible producir energía neta por fusión nuclear, una planta de potencia que genere electricidad tendría que ser más grande y compleja, pudiendo poner en peligro su comercialización.

¿Por qué los reactores de fusión tienen que ser tan grandes y costosos? Para responder a esta cuestión necesitamos primero entender unos conceptos básicos de la física de los plasmas de fusión. En primer lugar, debemos darnos cuenta que, en las condiciones de operación de los reactores, la densidad de potencia es proporcional a la presión absoluta del plasma. Por temas de estabilidad, la física determina la máxima presión normalizada y otros coefi-

FUSION AT MIT: THE HIGH MAGNETIC FIELD PATH

Alcator C-Mod has been the only divertor tokamak capable of operating with magnetic fields up to 8 Tesla and, given its compact size, accessing high power density regimes. On the last day of operation in 2016, Alcator C-Mod achieved the world-record plasma pressure in magnetically-confined devices, getting closer to ITER goals. Following this success and end of operation of Alcator C-Mod, the Plasma Science and Fusion Center (PSFC) at the Massachusetts Institute of Technology is involved in a new ambitious project: building SPARC, a tokamak that would generate net fusion energy for the first time. Thanks to the funding and collaboration with the private startup Commonwealth Fusion Systems, the PSFC is currently developing the first magnetic field coils for fusion with high temperature superconductors. Recent progress in this superconductor technology is making possible the design of high-performance, reduced-size magnets. These will be used in SPARC to generate a magnetic field of 12 Tesla on axis, which will allow a compact machine to generate more energy than consumed in heating and confining the hot plasma. SPARC will be a tokamak with parallel and complementary goals to ITER: demonstrate that the high-field, compact-reactors path is feasible for future fusion power plants.

cientes de seguridad. De esta forma, la expresión de la potencia por reacciones de fusión en plasmas con la misma geometría se reduce simplemente a $P_{fusion} \propto R^3B^4$. Esto significa que a mayor tamaño (R) y a mayor intensidad del campo magnético (B), más energía por fusión (P_{fusion}). Por otro lado, se observa que el coste de los reactores es aproximadamente proporcional a la energía magnética contenida en el plasma [3], $\propto R^3B^2$. Comparando estas dos expresiones, observamos que la economía de la energía de fusión se vuelve más interesante con campos magnéticos de alta intensidad, posibilitando el uso de reactores más pequeños, que pueden ser construidos de forma más barata y rápida, para la misma producción energética.

Hasta ahora, la intensidad del campo magnético ha estado limitada por la tecnología de los materiales superconductores, por lo que los reactores han tenido que ser más y más grandes para aumentar la energía producida por fusión. En los años noventa, el *tokamak* JET (proyecto europeo, localizado cerca de Oxford en Reino Unido) fijó el récord de producción de energía por fusión, con un máximo de 16 MW. Sin embargo, la condición de *breakeven* (producir más energía por fusión que la usada para calentar y mantener el plasma) aún no ha sido lograda, y es uno de los principales objetivos de ITER.

ALCATOR C-MOD (MIT)

Mientras tanto, la investigación llevada a cabo en laboratorios del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desde los años setenta [4] se ha centrado en la ingeniería de reactores compactos con campos magnéticos de alta intensidad, y en el estudio de la física de plasmas en estos regímenes. Con un volumen de plasma de tan solo ~1 m^3, la instalación experimental Alcator C-Mod, tercero en la serie de reactores compactos en el *Plasma Science and Fusion Center* de MIT, logró en 2016 el récord mundial de presión en plasmas por confinamiento magnético, acercándose así al objetivo de ITER [5], como se muestra en la Figura 1. Alcator C-Mod ha sido el único *tokamak* con divertor capaz de operar con campos magnéticos de hasta 8 Tesla y, dado su tamaño

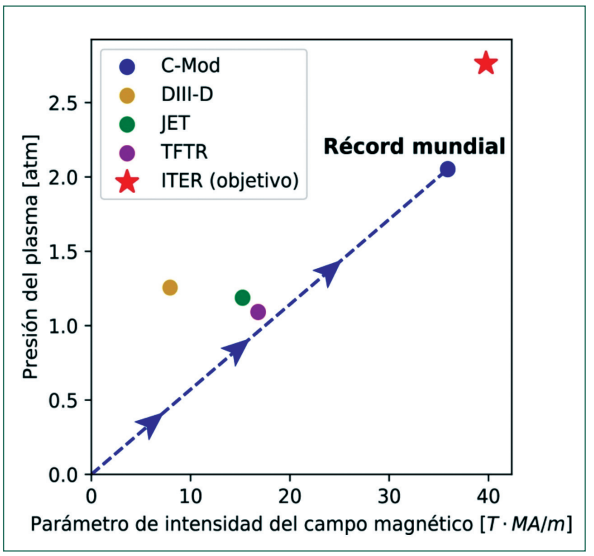

Figura 1. Máxima presión del plasma $\langle p \rangle$ en varios tokamaks como función del parámetro de intensidad del campo magnético ($B_T I_p/a$), así como el objetivo de ITER. La trayectoria hacia el récord mundial en C-Mod indica de manera aproximada la máxima presión obtenida por cada parámetro de intensidad del campo magnético. Datos adaptados de [5, y sus referencias], cortesía del Dr. J.W. Hughes (PSFC-MIT).

compacto, acceder regímenes de alta densidad de potencia [6]. Durante sus años de operación, C-Mod ha producido numerosos resultados importantes para la comunidad de científica y, particularmente, para ITER. Desde el uso de materiales de alto número atómico para los componentes en contacto con el plasma, hasta los avances en la tecnología del divertor, Alcator C-Mod ha estudiado temas esenciales para el desarrollo de la física de plasmas en condiciones relevantes para reactores de fusión, habiendo contribuido de manera importante al diseño y planes de operación de ITER. Además, C-Mod desarrolló por primera vez los regímenes de confinamiento mejorado (I-mode) y alto confinamiento Dα (EDA H-mode), que permiten operar sin las dañinas inestabilidades del borde, lo cual es muy prometedor para la fiabilidad de futuros reactores de fusión.

COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS

De manera indirecta y ajena a la física de plasmas, el campo de la fusión está viviendo una revolución, con uno de los avances que potencialmente podría cambiar el curso de su historia. Se trata del desarrollo de los superconductores de alta temperatura, o HTS por sus siglas en inglés, basados en óxidos de tierras raras [7]. Estos nuevos materiales se caracterizan por actuar como superconductores a temperaturas, densidades de corriente y campos magnéticos mucho mayores que los superconductores convencionales basados en el Niobio. Además, estos materiales se comercializan en forma de cintas flexibles y resistentes, lo que facilita su uso en bobinas con juntas desmontables. Hasta ahora, las bobinas magnéticas usadas en reactores de fusión de gran volumen como ITER han tenido un límite máximo de aproximadamente 6 Tesla en el centro del plasma, pero la tecnología HTS tiene el potencial de extender enormemente el espacio de operación en régimen de superconductividad, cuyo único límite en estos nuevos materiales está dado por las tensiones mecánicas.

Tras el cierre de Alcator C-Mod, científicos del PSFC han decidido dar un giro de 180 grados a la forma de financiación de la fusión en su laboratorio. En marzo de 2018, comenzó la actividad de la start-up Commonwealth Fusion Systems (CFS, https://www.cfs.energy/), la cual actualmente cuenta con importantes inversores internacionales, como la empresa energética italiana ENI [8] o la *Energy Breakthrough Coalition* [9], con nombres tan prominentes como Bill Gates, Jack Ma y Jeff Bezos, entre otros. El objetivo de CFS es comercializar la fusión como fuente de energía, basándose en el diseño y física básica de tokamaks convencionales y aprovechando la nueva tecnología HTS.

En 2015, un estudio liderado por estudiantes de MIT se publicó en la revista científica Fusion Energy and Design, con el diseño de una planta compacta de fusión con bobinas de HTS desmontables [10]. Esta planta piloto de fusión tomó el nombre de ARC (*Affordable, Robust, Compact*), y se trata de un tokamak con el tamaño aproximado de JET, pero que gracias a un campo magnético de 9 Tesla en el centro del plasma, podría generar 200 MW netos de energía eléctrica. Sin embargo, numerosos componentes de la física y la tecnología involucrada en esta planta de fusión todavía necesitan ser estudiados a fondo (Figura 2).

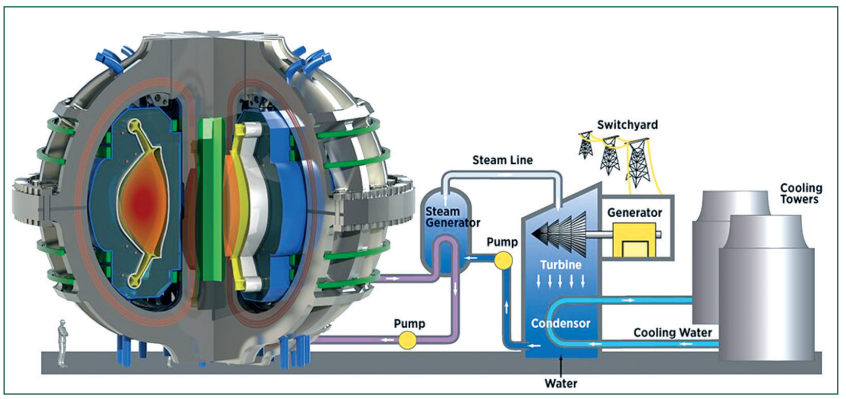

Figura 2. Una planta de fusión podría proporcionar energía limpia, sin emisiones, y con combustible prácticamente ilimitado. Desde el punto de vista de la generación eléctrica, el reactor de fusión ARC [9] actuaría como una fuente más de calor, que puede usarse en un ciclo termodinámico convencional. Adaptación de *Wikimedia Commons*.

Figura 3. El experimento SPARC sería el primero en lograr plasmas que produzcan energía neta. Visualización de Ken Filar, investigador afiliado al MIT-PSFC.

PROYECTO SPARC (“*Soon as Possible ARC*”)

El primer paso hacia ARC será el desarrollo de las primeras bobinas con HTS, seguido del estudio de plasmas en SPARC (*Soon as Possible ARC*), un *tokamak* que alcanzará condiciones de producción de energía neta [11]. Gracias al conocimiento que se ha adquirido al cabo de los años en el laboratorio de Massachusetts, tanto el desarrollo de las bobinas y la construcción y operación de SPARC se realizarán como una colaboración entre MIT y CFS.

Las nuevas bobinas con HTS serán usadas en SPARC para producir un campo magnético de 12 Tesla en el centro del plasma, permitiendo generar, en una máquina de tamaño medio (aproximadamente como los tokamaks actuales ASDEX *Upgrade* y DIII-D), más energía de la consumida en calentar y mantener el plasma. Uno de los rasgos del proyecto SPARC más característicos es el empleo de física de plasmas convencional, con parámetros adimensionales dentro de los rangos explorados en máquinas que han operado a lo largo de los años. SPARC hará uso de mezclas deuterio-tritio para conseguir energía de fusión, de manera similar a los plasmas de ITER. Sin embargo, la alta intensidad de los campos magnéticos de SPARC le permitirá tener un volumen 50 veces menor, lo que se traduce en menores tiempos de construcción y coste, pudiéndose llevar a cabo a la escala de una universidad o laboratorio. Por ejemplo, la construcción de JET, una máquina aproximadamente 7 veces más grande que SPARC, llevó menos de 5 años.

En resumen, como consecuencia de los éxitos de la serie de reactores compactos de MIT (en particular Alcator C-Mod), el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura, y gracias a colaboraciones con la empresa privada CFS, el laboratorio del MIT tiene como objetivo demostrar la producción neta de energía por fusión a través del experimento SPARC en menos de una década. El conocimiento y experiencia en física de plasmas y tecnología de reactores logrados al cabo de los años son una pieza esencial para el proyecto que, con objetivos paralelos y complementarios a ITER, busca demostrar que la ruta del alto campo magnético, alta densidad y reactores compactos es viable para futuras plantas de fusión para producción de energía.■

REFERENCIAS

[1] P. Fairley, “Why Don’t We Have More Nuclear Power?”, MIT Technology Review (2015); https://www.technologyreview.com/s/537816/why-dont-we-have-more-nuclear-power/
[2] F. Harvey, “Iter nuclear fusion project reaches key halfway milestone”, The Guardian (2017); https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/06/iter-nuclear-fusion-project-reaches-key-halfway-milestone
[3] M. Greenwald, Magnetic Fusion From Experiments to Power Plants, p 295-322 (2016); https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100315-2.00010-6
[4] G. J. Boxman et al, 7th European Conference on Plasma Physics, Lausanne, Switzerland (1975); https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:8284968
[5] J.W. Hughes et al, Nucl. Fusion 58 112003 (2018); https://doi.org/10.1088/1741-4326/aabc8a
[6] M. Greenwald et al, Phys. Plasmas 21, 110501 (2014); https://doi.org/10.1063/1.4901920
[7] L. Bromberg et al, Fusion Eng. Des. 54, 167-180 (2001); https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00432-4
[8] H. Devlin, “Nuclear fusion on brink of being realised, say MIT scientists”, The Guardian (2018); https://www.theguardian.com/environment/2018/mar/09/nuclear-fusion-on-brink-of-being-realised-say-mit-scientists
[9] A. Rathi, “In search of clean energy, investments in nuclear-fusion startups are heating up”, Quartz (2018); https://qz.com/1402282/in-search-of-clean-energy-investments-in-nuclear-fusion-startups-are-heating-up/
[10] B. N. Sorbom et al, Fusion Eng. Des. 100, 378-405 (2015); https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.008
[11] M. Greenwald et al, PSFC Report PSFC/RR-18-2, Harvard Dataverse, V1 (2018); https://doi.org/10.7910/DVN/OYYBNU