

La energía de fusión: mitos y realidades

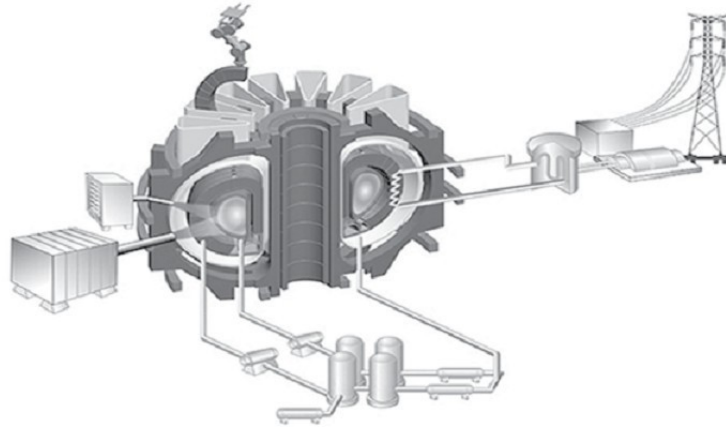


Figura 1. Diagrama de una planta de fusión nuclear. A la derecha del reactor de fusión se encuentran los dispositivos de generación de electricidad: generador de vapor, turbina e instalaciones de distribución. Fuente: <http://francis.naukas.com/2013/02/15/el-futuro-de-la-fusion-nuclear-en-corea-del-sur/>

Federico Vázquez Hurtado
Centro de Investigación en Ciencias, UAEM.
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

Primera parte.

Se menciona frecuentemente que los reactores de fusión tienen grandes ventajas sobre los reactores de fisión al producir energía para el bienestar humano [1]. En este sentido, se ha afirmado que dichos reactores son fuentes limpias de energía, dado que no producen desechos radiactivos que contaminan el ambiente. Se asegura, así mismo, que la generación de energía a partir de la fusión se realiza sin emisión de gases invernadero que agudizan el problema del calentamiento global. También se ha dicho que en ellos no pueden ocurrir procesos en cadena que conduzcan a su calentamiento y derretimiento provocando sucesos trágicos como el de Chernóbil en 1986 en la entonces Unión Soviética o el de Fukushima en Japón en 2011. Hay también quienes afirman que las reacciones en un reactor de fusión no producen materiales que puedan ser utilizados en la producción de armas nucleares. Sumemos a todo lo anterior que el combustible de los reactores de fusión, el deuterio, se encuentra en el mar en cantidades prácticamente ilimitadas. ¿Qué más se puede pedir a una fuente de energía?

Recientemente, sin embargo, Daniel Jassby escribió en el *Bulletin of Atomic Scientists* un artículo sugerente en el que cuestiona seriamente algunas de las ventajas mencionadas de la producción de energía a partir de procesos de fusión [2]. Jassby es un físico que trabajó durante 25 años en el

Laboratorio de Física de Plasmas en Princeton como investigador principal, retirándose en 1999. Se dedicó justamente a la física de plasmas y la producción de neutrones apoyando la investigación y el desarrollo de la energía de fusión. Hay que mencionar que en el laboratorio mencionado, durante las décadas de los 80-90s del siglo pasado, se produjeron algunos de los avances científicos y técnicos que hoy constituyen los fundamentos de los reactores de fusión concebidos para ser operados a escala de producción comercial.

En este artículo me propongo, principalmente, esbozar las conclusiones de Jassby sobre los reactores de fusión y su respectiva argumentación. Pero creo que será útil para el lector que describa primero algunos detalles de los procesos que ocurren en un reactor de fusión experimental y que esperanzadamente podrán ser aprovechados en reactores comerciales en un futuro próximo, aunque cada vez más aplazado. Para empezar, los reactores de fusión producen esencialmente energía calorífica, la cual es utilizada para calentar agua y producir vapor a presión que luego se emplea para mover generadores de electricidad (quizás la Figura 1 da una idea de lo anterior). Así, la potencia con la que se produce energía calorífica primaria se mide en MWt (megawatts térmicos o simplemente megawatts) y la de la energía eléctrica de salida en MWe (megawatts eléctricos). Ambas unidades se refieren a la cantidad de energía (en joules) producida en cada unidad de tiempo (segundos) dando la unidad que se conoce como watt (joules/seg). El prefijo mega es empleado con frecuencia actualmente y significa millones de algo. El proceso

básico en un reactor es parecido al que ocurre de manera natural y constante en el Sol a altas temperaturas y a presiones que producen densidades muy altas de materia. Estas presiones se originan en la gran fuerza de atracción gravitatoria del núcleo solar. En el Sol se fusionan dos átomos de hidrógeno para producir un átomo de helio, un neutrón (partícula sin carga eléctrica del núcleo atómico) y energía. Las temperaturas que en la Tierra es necesario alcanzar para producir el mismo fenómeno son muchísimo mayores que las del Sol debido a que no es posible reproducir las presiones existentes en él. En la Tierra se necesitarían cientos de millones de grados Celsius o más precisamente alrededor de seis veces la temperatura del Sol. Este ha sido el principal obstáculo técnico para aprovechar la energía de la fusión en artefactos construidos por el hombre. Así, los esfuerzos de desarrollo tecnológico se han encaminado principalmente a lograr que la energía requerida para producir las temperaturas y presiones para que tengan lugar reacciones de fusión no represente una fracción importante de la energía que se obtiene de ellas. Una vez que se desarrollen las técnicas que permitan mantener las condiciones de fusión y produzcan sobrantes, la energía que se obtenga bastará no sólo para mantener las mismas sino para disponer de excedentes que permitirán satisfacer necesidades vitales. En este sentido, se están perfeccionando dos técnicas que ponen a la investigación cada vez más cerca de lograr ese propósito. Por un lado, el confinamiento magnético y, por otro, el confinamiento inercial por medio de láseres. En el primer caso, se utilizan campos magnéticos intensos para mantener el com-

combustible nuclear en una región del espacio donde se producen las reacciones de fusión liberando energía. El confinamiento inercial consiste en el bombardeo con láseres de un pequeño blanco que contiene combustible nuclear a fin de comprimirlo y lograr las condiciones de temperatura y presión en las que ocurren las reacciones de fusión.

El lector recordará que la fuerza de Coulomb es una fuerza (repulsiva o atractiva) entre cargas eléctricas que crece conforme la distancia entre ellas disminuye, de modo que para que dos núcleos atómicos, con carga positiva, se acerquen suficientemente para fusionarse debe vencerse la fuerza repulsiva de Coulomb que actúa entre ellos. ¿Cómo es posible esto? Esto se logra si los nú-

cleos son el núcleo mismo del átomo (un protón). Para obtener un balance energético favorable (Energía útil = Energía de Fusión - Pérdidas por Radiación - Pérdidas por Conducción), el plasma debe "quemarse". Tal condición (llamada ignición o combustión) involucra un número tan grande de reacciones nucleares que la energía liberada no sólo satisface necesidades energéticas (energía útil) sino compensa las pérdidas al exterior (pérdidas por radiación y por conducción) manteniendo las elevadas temperaturas requeridas por la fusión sin aporte alguno de energía desde el exterior. Estas son las condiciones de operación que se busca lograr en los reactores de fusión comerciales y para ello se dedican grandes esfuerzos de investigación científica

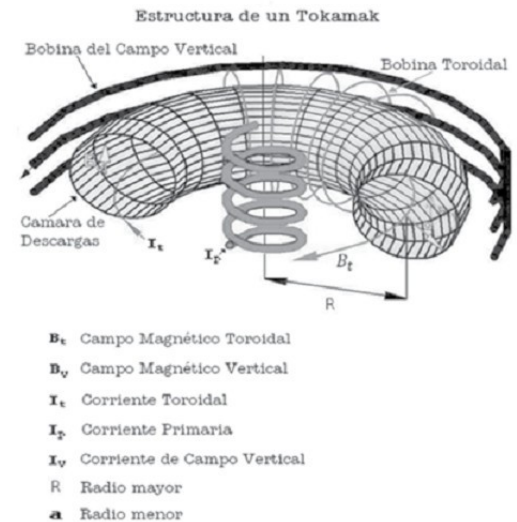


Figura 2. Estructura tokamak. Fuente: Vázquez, Mario. **SOBRE LA INGENIERÍA DEL TOKAMAK Y LA FÍSICA DEL PLASMA**. ESIME-IPN. Informe Interno. 2008.

pleos poseen una energía cinética suficientemente grande, lo cual se traduce en que es necesario elevar la temperatura de los núcleos a varios millones de grados Celsius. Ahora, con la fuerza eléctrica coexiste otra fuerza entre los núcleos: la fuerza nuclear, que es atractiva y que también crece conforme la separación entre ellos disminuye, de modo que si los núcleos están suficientemente cerca esta fuerza puede dominar a la fuerza de Coulomb y juntarlos suficientemente de modo que los núcleos se fusionan formando un núcleo más pesado y liberando energía. El lector habrá notado que he hablado de núcleos y no de átomos. Resulta que a las temperaturas mencionadas los átomos no pueden existir dado que los electrones se separan de ellos formando lo que conocemos como un plasma compuesto por iones y electrones libres. En el caso del hidrógeno eso

y tecnológica en todo el mundo. El criterio de Lawson [3] describe las condiciones en las que se produce la combustión del plasma. Baste decir que dicho criterio establece la relación entre la tasa de producción de energía de fusión con la densidad del plasma, la probabilidad de que dos núcleos que se encuentran se fusionen y la energía liberada en una reacción de fusión. Se puede entonces calcular la energía producida por fusión de núcleos en un plasma en condiciones específicas y luego introducir este factor en el balance de energía para determinar si el plasma está en combustión. El confinamiento magnético es una técnica que utiliza campos magnéticos para mantener el plasma caliente en una región limitada del espacio lejos de las paredes de la cámara del reactor (Figura 2). La técnica surgió en los años 40s del siglo XX y se consolidó cuando en los 50s un equipo soviético

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx

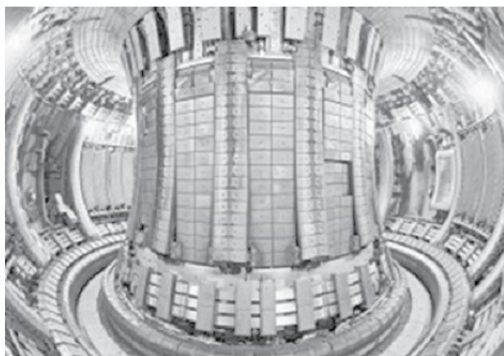


Figura 3. Interior de la cámara de fusión del reactor de fusión JET en el Reino Unido. Fuente: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fusion-nuclear>.

encabezado por Andréi Sájarov (posteriormente disidente en la Unión Soviética y premio Nobel de la Paz) propuso el diseño de confinamiento conocido como tokamak. Este es el acrónimo del ruso *тороидальная камера с магнитными катушками* que se "escucha" como *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkam*. En español esto se traduce como cámara toroidal de bobinas magnéticas. El lector puede darse una idea de la forma de una cámara toroidal si piensa en el interior de una dona (Figura 3). Este diseño es hasta la fecha el más promisorio para la producción controlada de energía a partir de reacciones de fusión. De hecho, se usa en el proyecto International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), el cual es un esfuerzo multinacional que tiene el propósito de construir un reactor capaz de producir una potencia del orden de 500 MW [4]. El prototipo se está construyendo en Francia y se espera que entre en operación en 2035. En la Figura 4 se encuentra un diagrama del reactor completo. La potencia que se espera obtener del ITER tiene un valor intermedio comparada con la potencia de las plantas termoeléctricas existentes y que, para su operación utilizan combustibles fósiles. En el mundo hay plantas de este tipo con potencias desde unas cuantas decenas de MW hasta 1500 MW o más. El lector puede comparar también la potencia del ITER con la potencia que produce un generador eólico de eje horizontal de escala grande (como los instalados en la región de "La Ventosa", Oaxaca, en nuestro país), la cual es de alrededor de 2 MW. Para producir la energía del ITER se necesitarían 250 de esos generadores. Pero la potencia del ITER será insuficiente, como se argumentará en la segunda parte de este artículo, para cubrir los gastos de personal especializado, de operación y recuperación de inversión. Los reactores comerciales deberán tener una capacidad de generación de al menos el doble que la del ITER.

En el Sol ocurren de manera constante reacciones en las que se fusionan núcleos de átomos de hidrógeno produciendo isótopos de helio y energía (un isótopo contiene un número diferente de partículas en el núcleo que el átomo del cual proviene, por ej., el deuterio es un átomo de hidrógeno con un neutrón en el núcleo y por lo tanto su masa es el doble; el hidrógeno común no tiene neutrones). Hay que recordar que dichas reacciones ocurren a grandes presiones y altas temperaturas. Pero en la escala terrestre no es posible alcanzar las densidades derivadas de la enorme presión que produce la fuerza gravitatoria del núcleo solar, y por ello, para replicar las reacciones del hidrógeno se requerirán temperaturas del orden de cientos de millones de grados Celsius, hecho que constituye por sí mismo un obstáculo insuperable. En los dispositivos de fusión actuales esta dificultad se resuelve utilizando como combustible deuterio y tritio (isótopo del hidrógeno con dos neutrones y un protón en el núcleo) en dos combinaciones: deuterio-deuterio y deuterio-tritio. ¿Por qué? Por que estos poseen una reactividad mucho mayor que la del hidrógeno, de tal manera que pueden fusionarse a densidades y temperaturas más bajas que las del Sol. El deuterio y el tritio tienen una reactividad 10^{24} (uno seguido de 24 ceros) veces mayor que la del hidrógeno común y las densidades y temperaturas necesarias para la fusión son 10^9 y 10^{12} (entre mil millones y un billón) de veces más bajas, respectivamente. La reacción deuterio-tritio puede verse en la Figura 5, que proviene de la página del ITER [4]. Al utilizar isótopos ricos en neutrones para la fusión, los reactores de fusión terrestres producen desechos peligrosos: un caudal de neutrones muy energéticos que constituyen el 80% de la energía liberada de la fusión en el caso de reacciones deuterio-tritio y el 35% en el caso de reacciones deuterio-deuterio. Es aquí donde surgen los principales problemas asociados a la

fusión nuclear y que desmitifican su fama como fuente de energía "limpia". Estos problemas son cuatro: 1) daño por radiación a las estructuras; 2) desechos radioactivos; 3) necesidad de blindaje biológico y, 4) posibilidad de producción de materias primas para la producción de armas nucleares. Pero esta lista no acaba aquí. Los neutrones de la fusión nuclear se emplean para producir tritio, que se reutiliza como combustible del reactor (más adelante se explica este procedimiento). Lo anterior requiere enormes cantidades de refrigerantes y tiene altos costos de operación. Todavía hay que agregar que el tritio prácticamente no existe naturalmente en el ambiente (debido a que su vida media es corta: 13 años), y que en la operación de un reactor nuclear existen grandes pérdidas de ener-

de manta con litio envolviendo al reactor. Los neutrones liberados en las reacciones nucleares, irradian el litio de la manta protectora "creando" tritio. El impacto de un neutrón con un átomo de litio causa la fisión del litio en un átomo de tritio (más ligero y radioactivo) y un átomo de helio. Ahora, los alrededores del reactor están mayormente ocupados por la parafernalia requerida para equipos de vacío y de inyección de combustible al reactor. Los más optimistas cálculos predicen que sólo se podrá utilizar el 15 % de energía útil para producir el tritio consumido, misma que debe utilizarse también en parte para procesar el tritio creado en la manta de litio. El reponer el tritio quemado en el reactor es en realidad cosa menor si se le compara con lo que se requiere hacer para

recuperar en este ciclo sólo un 1% de tritio, al cabo de 10 o más veces resultaría en una pérdida de aproximadamente del 10% de combustible que no puede ser proporcionado por la manta de litio. Esto provoca una dependencia permanente respecto a la otra fuente de tritio posible: ¡los reactores de fisión! De hecho, esto sitúa a la energía de fusión como la única fuente de energía que requiere de combustible que no se encuentra naturalmente en el ambiente, en contraste con ¡todas! las otras fuentes, incluyendo los reactores de fisión, que consumen combustibles que sí se encuentran en la naturaleza. Como se recordará, las otras fuentes de energía consumen energía solar, energía potencial (represas de agua), petróleo, gas, e incluso los reactores de fisión consumen uranio que se extrae de yacimientos en contadas partes del mundo (Kazajistán, Canadá, Australia, Namibia, Rusia y Níger, según datos de 2009). Terminó aquí la primera parte de este artículo. En la siguiente y última parte discutire en detalle el balance energético en un reactor de fusión y expondré los principales problemas y riesgos que enfrenta la generación de energía por este medio. También platicaré una parte de la historia de la fusión en México. Reconocimiento. Agradezco al Dr. Julio Herrera (Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM) el haber hecho de mi conocimiento el artículo de David Jassby en el cual está basado este escrito.

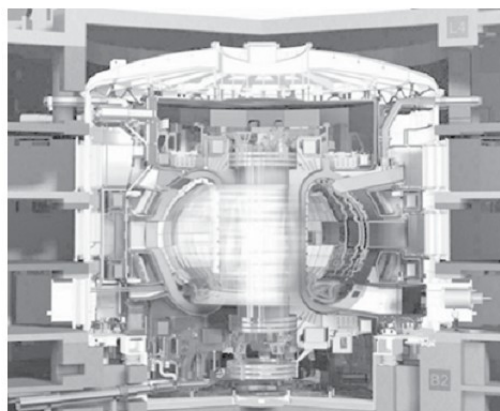


Figura 4. Diagrama de la estructura completa del ITER. Fuente: <https://thebulletin.org/bio/daniel-jassby>.

gía que reducen, evidentemente, la cantidad de energía útil. Ahora, la reacción deuterio-tritio es la candidata preferida por los diseñadores porque su reactividad es 20 veces mayor que la de su competencia, la reacción deuterio-deuterio. Además, es más intensa a un tercio de la temperatura requerida por la última. En principio, por cada miligramo de deuterio-tritio se pueden obtener 335 MJ. ¿Cuánto representa esto? El lector puede darse una idea si piensa en que con 335 MJ pueden evaporarse alrededor de 150 litros de agua. Por otro lado, en cada metro cúbico de agua de mar hay aproximadamente 34 gramos de deuterio. El deuterio disponible en el mar constituye entonces la mayor "reserva" terrestre de energía que podría durar (a la tasa de consumo actual) alrededor de cinco millones de años. Pero ¿de dónde sacar el tritio requerido por las reacciones de fusión si éste es prácticamente inexistente en la naturaleza? Las únicas fuentes son, ¡oh, paradójico!, los reactores de fisión o también los propios reactores de fusión. Esto último se logra colocando una especie

mantener el combustible necesario en la cámara del tokamak. En realidad, sólo el 10% del tritio se quema antes de que escape de la zona de combustión y se difunda hacia las paredes del reactor y los equipos aledaños. Es entonces necesario atraparlos antes y conducirlo a la cámara de combustión unas 10 o más veces para que se queme totalmente. Pero suponiendo que no fuera posible

Referencias

- [1] Martinell Benito, Julio J. Fusión Nuclear en México. Ciencia y Desarrollo, mayo-junio 2017. <http://www.cienciaydesarrollo.mx/?p=articulo&id=253>
- [2] <https://thebulletin.org/fusion-reactors-not-what-they%E2%80%99re-cracked-be10699>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion
- [4] <https://www.iter.org/proj/inafelines#6>

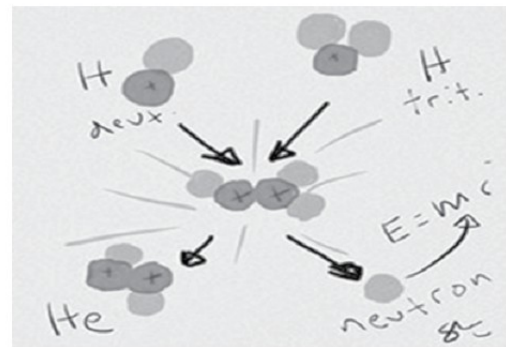


Figura 5. Reacción deuterio-tritio. Fuente: <https://www.iter.org/proj/inafelines#6>.