

# La energía de fusión: mitos y realidades

**Federico Vázquez Hurtado**

Centro de Investigación en Ciencias, UAEM.

Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

Segunda parte.

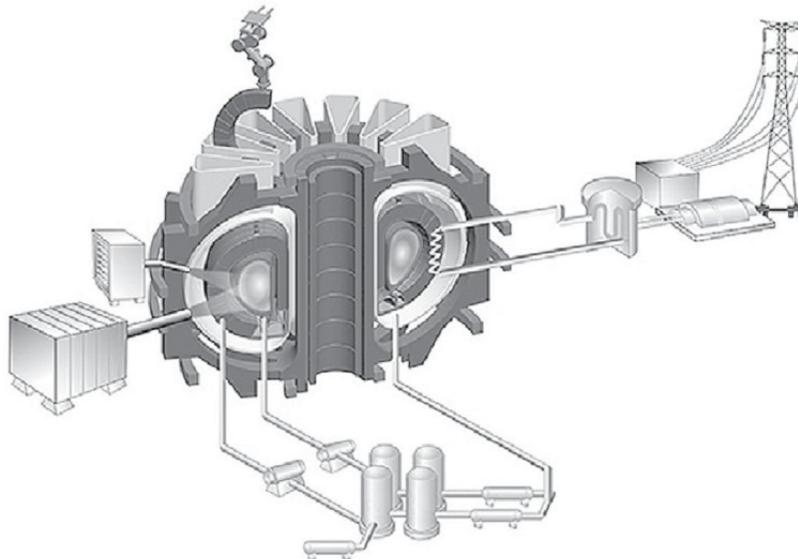
En la primera parte de este artículo expuse las bases físicas del funcionamiento de un reactor de fusión (Véase: <http://www.acmor.org.mx/?q=content/la-energ%C3%ADa-de-fusi%C3%B3n-mitos-y-realidades>). Los reactores de fusión producen esencialmente energía calorífica, la cual es utilizada para calentar agua y producir vapor a presión que luego se emplea para mover generadores de electricidad, Figura 1. Se afirma frecuentemente que este tipo de dispositivos para la generación de energía eléctrica tiene ventajas sobresalientes sobre los reactores de fisión [1]. Resumiré aquí dichas ventajas:

- 1) No producen desechos radioactivos que contaminan el ambiente,
- 2) No arrojan al ambiente gases tipo invernadero,
- 3) No tienen riesgos de sobrecalentamiento y de su consecuente destrucción,
- 4) No producen productos radioactivos que puedan utilizarse para fabricar armas nucleares,
- 5) Consumen deuterio, un isótopo del hidrógeno, que se encuentra naturalmente en cantidades ilimitadas en el mar.

Pero, ¿qué hay de cierto en todo ello? En esta parte concluiré el interesante análisis que David Jassby (un físico que trabajó en el laboratorio de plasmas de la Universidad de Princeton durante 25 años) publicó en el *Bulletin of Atomic Scientists* [2] sobre la producción de energía a partir de reacciones de fusión. Inicié su discusión en la primera parte de este artículo. Las conclusiones de Jassby permitirán al lector, sin duda, juzgar la validez de las supuestas ventajas de los reactores de fusión. Concluiré con un poco de la historia de la fusión en México.

Para iniciar, hablaré un poco sobre los equipos auxiliares del reactor de fusión conocido como tokamak (este dispositivo posee una cámara de confinamiento magnético con forma de dona donde se producen las reacciones de fusión de átomos liberando energía). En Francia con apoyo científico y financiero multinacional se está construyendo un prototipo comercial de tokamak conocido como International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [3]. Una lista abreviada de los auxiliares de un tokamak debe incluir las plantas de producción de helio líquido (utilizado para enfriar los imanes superconductores por su bajísimo punto de ebullición), bombas de agua, equipos de vacío, calentadores, acondicionadores de temperatura ambiente en numerosos edificios, y el equipo de procesamiento del tritio que discutimos en la primera parte de este artículo. La energía necesaria para mantener en funcionamiento a todos ellos es alrededor de 100 MWe (mega watts eléctricos). Hay que decir que estos equipos deben funcionar aún en condiciones de paro del reactor por lo que las instalaciones deben disponer del aporte de la red de electricidad local para suplir la falta de energía eléctrica durante el paro. Hay una segunda clase de energía requerida para el funcionamiento del reactor de fusión. En primer lugar, la energía para el control del plasma para asegurar la mayor estabilidad posible de la flama de fusión y la energía para localizar y estabilizar el plasma con el fin de reducir su escape de la zona de combustión. Lo primero se logra por medio de haces atómicos o energía electromagnética y lo segundo con las bobinas magnéticas del dispositivo. Esto consume alrededor del 6% de la energía producida por el reactor. El enfriamiento de la manta de litio consume típicamente el 2% de la energía. La potencia neta eléctrica del reactor puede ser como el 40% de la potencia de fusión, y la potencia que circula por el sistema en un reactor auto-sostenido puede ser alrededor de 20% de la energía eléctrica producida.

Pero aquí hay algo interesante. Las pérdidas de energía descritas imponen una cota mínima al tamaño del reactor. Esto quiere decir que por debajo de dicha cota un reactor no producirá suficiente energía para satisfacer los requerimientos de su funcionamiento y control y disponer de energía de sobra para la venta. Así, si un reactor posee una potencia de 300 MW, los 120 MW (el 40% de la potencia de fusión) de potencia eléctrica que es capaz de producir apenas alcanzan para satisfacer las necesidades que ascienden a 124 MW (100 MW (funcionamiento de los equipos auxiliares)+24 MW (6%+2% de la potencia de fusión del reactor para control y enfriamiento de la manta de litio). Si



**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/>

el reactor tiene, en cambio, una potencia de fusión de 830 MW los requerimientos de funcionamiento y control son de 166.4 MW, los cuales representan la mitad de la potencia eléctrica producida por el reactor (322 MW, que es el 40% de 830 MW). El reactor tiene otros 166 MW para comerciar. La cota mínima comúnmente aceptada para que un reactor permita además suplir gastos de operación y recuperar inversiones es de 1000 MW. Lo anterior puede seguirse con más claridad en la Tabla 1. Los neutrones liberados en la reacción deuterio-tritio son altamente energéticos. Esto provoca que los daños estructurales que sufre un reactor de fusión sean más importantes que los de un reactor de fisión. Los neutrones son desacelerados en las paredes del reactor, en la manta de litio y en los enfriadores, causando expansión y fractura de los materiales irradiados. Al mismo tiempo, los neutrones reaccionan con los materiales produciendo hidrógeno y helio en su interior, gases que provocan una expansión adicional y fatiga de los materiales. Todo ello compromete la integridad de las paredes del reactor. También, las reacciones de los neutrones con los átomos que forman la estructura vuelven radioactivos a estos. Todo esto obliga a tener que reemplazar la estructura periódicamente con el consiguiente problema de manejo de enormes cantidades de materiales radioactivos.

Un reactor de fusión puede usarse para producir materiales radioactivos para fabricar armas nucleares. Los neutrones que resultan de la reacción deuterio-tritio pueden usarse para bombardear uranio 238 siendo el producto plutonio 239, el cual se utiliza para fabricar armas nucleares. La reacción es más efectiva a medida que la energía de los neutrones sea más baja. Los neutrones rápidos que surgen de la reacción deuterio-tritio son frenados en las estructuras del reactor resultando idóneos para la formación del plutonio 239. El plutonio 239 tiene una vida media aproximada de 24,000 años y también se emplea como combustible en reactores de fisión.

El tritio producido en un reactor de fusión se dispersa sobre las paredes de la cámara de combustión del reactor, los inyectores de partículas, ductos, etc., causando daños por corrosión que pueden propiciar la liberación de tritio (radioactivo) a la atmósfera o a cuerpos de agua (la ruta es el agua de enfriamiento del reactor que se desecha al ambiente). En el agua el tritio sustituye al hidrógeno produciendo agua "trititada" que daña a los seres vivos.

¿Puede un reactor de fusión descontrolarse? El único riesgo de incendio o explosión está en el litio licuado que se encuentra

en el manto que rodea al reactor. Recordemos que ese manto es bombardeado por los neutrones provenientes de las reacciones de fusión.

Los reactores de fusión no producen gases de invernadero. Pero no olvidemos el consumo de energía convencional (producida por la quema de combustibles fósiles) que el reactor requiere en condiciones de paro (por reparaciones, mantenimiento, etc.)

Resumiendo. Los reactores de fusión, como sus similares de fisión, son dispositivos extremadamente complejos que producen energía útil para mover generadores de electricidad. Para ser utilizado comercialmente, la potencia de un reactor debe ser mayor que 1000 MW. Las reacciones de fusión causan daño estructural por el constante bombardeo de neutrones energéticos sobre los materiales que componen el reactor produciendo desechos radioactivos (daños, aunque de vida media corta del orden de decenas de años). Hay una posibilidad real de liberación de tritio a la atmósfera (daño) por difusión de este material, y son fuente de desechos de procesos de enfriamiento (potencialmente dañinos). Sus costos de operación son excesivamente altos. El gasto de inversión también, lo cual pone en duda que se trate de una fuente de energía barata como se ha pregonado. Los reactores de fusión pueden utilizarse como fuentes de neutrones para producir plutonio 239 que se usa para construir armas nucleares. No producen gases de efecto invernadero.

Estas son las conclusiones que Daniel Jassby sacó de su análisis, basadas en su gran experiencia como investigador en uno de los centros más prestigiosos del mundo en la investigación de plasmas de fusión. Ellas son una contribución, sin duda desapasionada y objetiva, a la discusión sobre la conveniencia del desarrollo de reactores de fusión para la producción de energía. No quiero dejar de mencionar, para cerrar este escrito, los esfuerzos mexicanos realizados en fusión nuclear (el lector interesado puede ver más detalles sobre esto en el artículo de Julio Martínell en Ciencia y Desarrollo [1]). Hace 68 años, en 1959, el reconocido físico mexicano Manuel Sandoval Vallarta, en la entonces Comisión Nacional de Energía Nuclear en México, concibió la necesidad de desarrollar la energía de fusión en nuestro país. Varios acontecimientos importantes habían ocurrido durante los años previos: Estados Unidos había hecho explotar dos bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki, lo cual condujo (casi de inmediato) a la rendición de Japón y al final de la Segunda Guerra Mundial; la bomba de Hidrógeno había

## ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: [editorial@acmor.org.mx](mailto:editorial@acmor.org.mx)



**Figura 2.** Reactor de fusión TPM-1 (tokamak prototipo mexicano 1). Construido en la ESIME-IPN. Actualmente se encuentra en el CICATA-Qro. Fuente: Vázquez, Mario. SOBRE LA INGENIERÍA DEL TOKAMAK Y LA FÍSICA DEL PLASMA. ESIME-IPN. Informe Interno. 2008.



**Figura 3.** El grupo de plasmas iniciado por Martín Nieto (primero desde la izquierda) y Gonzalo Ramos (no aparece en la imagen) y la cámara de fusión del tokamak TPM-1 U en el CICATA-IPN. Fuente: <http://noticiasdejuarez.blogspot.mx/2016/07/trabaja-el-politecnico-nacional-en.html>

explotado en el atolón de Bikini en 1952; en 1955 se habían desclasificado los resultados de las investigaciones que se hacían hasta entonces en secreto sobre fusión nuclear orientadas a resolver el problema de someter a control en el laboratorio la reacción de fusión entre los núcleos de los isótopos deuterio y tritio del hidrógeno. El Dr. Manuel Sandoval convocó entonces a Carlos Vélez Ocón y a Mario Vázquez Reyna, ambos investigadores de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, a participar en el inicio de actividades encaminadas a contribuir en la investigación básica asociada con los problemas de disponer de la nueva fuente de energía: la fusión nuclear. En la propia Comisión se formó entonces el laboratorio de plasmas que fun-

cionó inicialmente bajo la dirección de Carlos Vélez Ocón y después de Mario Vázquez Reyna hasta 1982. Ahí se construyeron algunos prototipos experimentales de reactores de fusión. La

experiencia adquirida durante varios años permitió el diseño, construcción y puesta en operación de un tokamak de pequeña escala conocido como "Novillo". Esto ocurrió en lo que ya era el sucesor de la Comisión: el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Posteriormente el programa de plasmas de fusión fue cancelado y el Novillo utilizado para el tratamiento de materiales: grabado, purificación, depósito controlado, etc. La interacción del plasma con la materia constituye actualmente un área de investigación muy activa y prometedora. Mario Vázquez Reyna se movió a la ESIME-IPN donde con un pequeño equipo de colaboradores diseñaron y construyeron otro reactor de fusión, también tipo tokamak, de pequeña escala conocido como TPM-1 (tokamak prototipo mexicano 1). En la Figura 2 se observa una imagen de dicho reactor en funcionamiento. El TPM-1 estuvo en operación hasta iniciado el nuevo siglo logrando mantener un plasma de hidrógeno confinado durante lapsos del orden de milisegundos. Al retiro de Mario Vázquez de las actividades académicas, este reactor pasó a formar parte de la infraestructura de investigación en fuentes alternas de energía del CICATA-Qro, también del IPN, bajo la dirección de Gonzalo Alonso Ramos López y Martín de Jesús Nieto Pérez. Bajo un rediseño, el TPM-1 se convirtió en el TPM-1U (Figura 3). Existen otros proyectos de fusión nuclear que se han desarrollado en nuestro país, de lo cual ha dejado constancia Julio Martinell en su artículo [1]. Sólo quiero resaltar también, para finalizar esta breve reseña, el proyecto llevado a cabo en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM por el grupo de Julio Herrera Velázquez conocido como "Fuego Nuevo II" [4], un dispositivo para producir fusión en plasmas magnetizados densos conocidos como "Plasma Focus" y mencionar que en la Universidad Autónoma de Nuevo León se está diseñando un reactor tipo tokamak. Como es de suponer, los objetivos de los grupos mexicanos dedicados a la fusión nuclear han estado muy lejos de construir un reactor de escala grande (10 MW o más) que requiere, como se ha mencionado, grandes inversiones de capital y de recursos humanos. Los trabajos hechos por ellos se han enfocado en la construcción de reactores de pequeña escala (menos de 10 MW). Estos pequeños reactores son aptos para varios propósitos relacionados con la investigación básica sobre: 1) el confinamiento magnético de plasmas de fusión para disminuir la tasa de pérdida de energía por difusión y conducción, 2) el desarrollo de nuevos conceptos de confinamiento, 3) el desarrollo de nuevos materiales para las paredes de la cámara de fusión que sean capaces de mantener su integridad ante el bombardeo de neutrones, 4) el uso de materiales superconductores en los embobinados que producen los campos magnéticos de confinamiento, y muchos otros problemas interesantes sobre la física de plasmas. Por último, los reactores pequeños son también ideales para el entrenamiento de personal especializado en aplicaciones novedosas de los plasmas de alta temperatura. Esto y sólo esto bastaría para justificar la reactivación en México de los programas de investigación en plasmas de fusión. 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.

#### 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://www.iter.org/proj/inafewlines#6>
- [4] [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:28024353](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28024353)

POTENCIA DE FUSIÓN (MW)	POTENCIA ÚTIL (40%) (MW)	EQUIPOS AUXILIARES (MW)	CONTROL DEL PLASMA (6%) (MW)	ENF. MANTA DE LITIO (2%) (MW)	a+b+c (MW)	POTENCIA CIRCULANTE
300	120	100(a)	18(b)	6(c)	124	100%
830	332	100(a)	49.8(b)	16.6(c)	166.4	50%

**Tabla 1.** Comparación del funcionamiento de dos reactores de fusión con potencias de 300 MW y 830 MW. Ver el texto.

Para actividades recientes de la Academia y artículos anteriores puede consultar:  
[www.acmor.org.mx](http://www.acmor.org.mx)