

Extract of Viento Sur

<https://vientosur.info/spip.php?article13859>

Energía

# La fusión nuclear: ¿energía del futuro?

- solo en la web -



Publication date: Viernes 1ro de junio de 2018

## Description:

La fusión nuclear -que no debe confundirse con la fisión nuclear- se presenta a menudo como la panacea para salvar la civilización del consumo ante el inevitable agotamiento de las fuentes de energía fósiles.

Licencia de Creative Commons BY - NC- ND Viento Sur

[La fusión nuclear -que no debe confundirse con la fisión nuclear, sobre cuya base operan las centrales nucleares actuales en todo el mundo- se presenta a menudo como la panacea para salvar la civilización del consumo ante el inevitable agotamiento de las fuentes de energía fósiles. Publicamos a continuación tres artículos de dos científicos expertos estadounidenses, y en los que polemizan sobre las posibilidades reales de los reactores de fusión. NdR.]

### Reactores de fusión: no son lo que prometían ser

Daniel Jassby

Durante mucho tiempo se ha venido ensalzando los reactores de fusión como la fuente energética *perfecta*. Sus defensores afirman que una vez se hayan desarrollado reactores de fusión comerciales viables, producirán enormes cantidades de energía con pocos residuos radiactivos, generando muy pocos subproductos de plutonio que puedan utilizarse para fabricar armas atómicas. Estos abogados de la fusión dicen asimismo que dichos reactores no podrían dar lugar a la peligrosa reacción en cadena susceptible de provocar el tipo de accidentes catastróficos que encierran los sistemas actuales de fisión en las centrales nucleares. Además, al igual que la fisión, un reactor nuclear de fusión tendría la enorme ventaja de producir energía sin emitir ni pizca de carbono, el principal culpable del calentamiento de la atmósfera de nuestro planeta.

Sin embargo, hay un problema: mientras que es más bien fácil -hablando en términos relativos- dividir un átomo para producir energía (es lo que ocurre en la fisión), supone un "gran reto científico" fusionar dos núcleos de hidrógeno para crear isótopos de helio (como ocurre en la fusión). Nuestro Sol realiza constantemente reacciones de fusión quemando hidrógeno ordinario en condiciones de enorme densidad y temperatura. Para reproducir este proceso de fusión aquí en la Tierra -donde no tenemos la enorme presión generada por la gravedad del núcleo solar- necesitaríamos una temperatura de por lo menos 100 millones de grados Celsius, unas seis veces más que la que impera en el Sol. En experimentos realizados hasta ahora, la energía necesaria para alcanzar la temperatura y la presión que permiten reacciones de fusión significativas para crear isótopos de helio ha superado de lejos la energía de fusión generada.

No obstante, mediante el uso de tecnologías de fusión prometedoras, como el confinamiento magnético y el confinamiento inercial con láser, la humanidad se acerca mucho más a la solución del problema y a ese punto de inflexión en que la cantidad de energía obtenida de un reactor de fusión supere la cantidad aportada, generando energía neta. Los proyectos multinacionales colaborativos en curso incluyen el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER), que está construyéndose en Francia desde que se crearon las primeras estructuras de apoyo en 2010. Se espera que los primeros experimentos en su máquina de fusión, llamada *tokamak*, comiencen en 2025.

A medida que nos acercamos al objetivo, sin embargo, es hora de preguntarnos si la fusión es realmente la fuente de energía *perfecta*. Después de haber estado trabajando en experimentos de fusión durante 25 años en el laboratorio de física del plasma de la Universidad de Princeton, comencé a contemplar menos apasionadamente toda la cuestión de la fusión. Concluí que un reactor de fusión no sería ni mucho menos perfecto, y en ciertos aspectos estaría incluso más cerca de todo lo contrario.

### El Sol en miniatura

Como ya he señalado, las reacciones de fusión en el Sol queman hidrógeno ordinario en condiciones de enorme densidad y temperatura, sostenidas por un tiempo de confinamiento efectivamente infinito, y los productos de la reacción son isótopos de helio benignos. Los sistemas de fusión artificiales (terrestres), por otro lado, se limitan a

unas densidades de partículas mucho más bajas y un confinamiento energético mucho más fugaz, por lo que no pueden emplear más que los isótopos de hidrógeno más pesados y ricos en neutrones, llamados deuterio y tritio, que son 24 órdenes de magnitud más reactivos que el hidrógeno ordinario. (Pensemos en un numeral uno con 24 ceros detrás.) Esta enorme ventaja de reactividad permite que los dispositivos de fusión artificiales operen con una densidad de partículas mil millones de veces más baja y un confinamiento de energía un billón de veces más bajo que los niveles de que disfruta el Sol. Los defensores de los reactores de fusión afirman que cuando estén desarrollados, los reactores de fusión constituirán una fuente de energía *perfecta* que no presentará ninguno de los defectos significativos de los tan denostados reactores de fisión.

Pero a diferencia de lo que ocurre en la fusión solar -que utiliza hidrógeno ordinario-, los reactores de fusión terrestres que queman isótopos ricos en neutrones generan subproductos que son todo menos inocuos: los flujos energéticos de neutrones contienen un 80 % de energía de fusión proveniente de reacciones de deuterio-tritio y un 35 % de reacciones de deuterio-deuterio. Ahora bien, una fuente de energía consistente en un 80 % de flujos energéticos de neutrones tal vez sea la fuente de neutrones perfecta, pero es realmente curioso que jamás se la haya calificado de fuente ideal de energía eléctrica. De hecho, estos flujos de neutrones causan directamente cuatro problemas lamentables de la energía nuclear: daños por radiación en las estructuras; residuos radiactivos; la necesidad de un blindaje biológico; y el potencial para la producción de plutonio 239, susceptible de ser utilizado para armamento, agravando de este modo la amenaza de proliferación de armas nucleares, y no reduciéndolo, como les gustaría a quienes defienden la fusión.

Además, si los reactores de fusión fueran realmente factibles, tal como se supone, compartirían algunos de los otros problemas graves que afectan a los reactores de fisión, entre ellos la liberación de tritio, enormes necesidades de refrigeración y elevados costes de explotación. También habrá inconvenientes adicionales, propios de los sistemas de fusión: el empleo de un combustible (tritio) que no se encuentra en la naturaleza y ha de reponerse en el propio reactor; y el inevitable consumo de electricidad en el propio lugar de producción, que reduce drásticamente la electricidad disponible para la venta.

Todos estos problemas son endémicos de cualquier tipo de reactor de fusión por confinamiento magnético o inercial que se alimente con deuterio-tritio o deuterio solo. (Como su nombre indica, en la fusión por confinamiento magnético se utilizan campos magnéticos y eléctricos para controlar el combustible de fusión caliente, un material que adopta una forma difícil de manejar, llamada plasma. En el confinamiento inercial se emplean rayos láser o iónicos para comprimir y calentar el plasma.) El ejemplo más conocido de fusión por confinamiento magnético es la *tokamak* en forma de rosquilla que está construyéndose en la sede del ITER; la fusión por confinamiento inercial la ejemplifican las microexplosiones inducidas por láser que se producen en la Planta Nacional de Ignición de EE UU.

### **El combustible tritio no puede reponerse completamente**

La reacción deuterio-tritio es la preferida por los impulsores de la fusión porque es veinte veces más reactiva que la reacción deuterio-deuterio, y además alcanza su mayor efectividad a una temperatura equivalente a un tercio de la requerida para la fusión de deuterio exclusivamente. De hecho, una mezcla aproximadamente a partes iguales de deuterio y tritio puede constituir el único combustible de fusión factible dentro de un futuro previsible. Mientras que el deuterio está disponible en gran cantidad en el agua corriente, el tritio apenas existe en estado natural, ya que este isótopo es radiactivo y tiene una vida media de tan solo 12,3 años. La principal fuente de tritio son los reactores nucleares de fisión.

Si se adopta, la fusión basada en deuterio-tritio sería la única fuente de energía eléctrica que no utiliza un combustible existente en la naturaleza ni convierte una energía generada naturalmente como la radiación solar, el viento, la caída de agua o la geotermia. Lo que ocurre es que el componente tritio del combustible de fusión ha de generarse en el propio reactor de fusión. Teóricamente, el tritio consumido en la fusión puede regenerarse

completamente a fin de sostener las reacciones nucleares. Para que esto se cumpla es preciso crear alrededor del medio reactivo un *manto* que contenga litio, un gas extremadamente caliente, totalmente ionizado, que se denomina plasma. Los neutrones producidos en la reacción de fusión irradiarán el litio, *incubando* de este modo el tritio.

Pero existe una dificultad importante: el manto de litio solo puede rodear parcialmente el reactor debido a los espacios libres necesarios para el bombeo de vacío y la inyección de combustible en los reactores de fusión con confinamiento magnético y para los rayos láser y la eliminación de los restos del blanco en los reactores de confinamiento inercial. No obstante, los análisis más completos indican que puede haber hasta un 15 % de excedente en la regeneración de tritio, pero en la práctica, todo excedente se requerirá para acomodar la extracción incompleta y el procesado del tritio generado en el manto.

Sin embargo, la sustitución del tritio consumido en un reactor de fusión solo aborda una parte menor de la cuestión importantísima de la reposición del suministro de combustible tritio. Menos del 10 % del combustible inyectado se quemará realmente en un dispositivo de fusión con confinamiento magnético antes de escapar de la zona de reacción. La mayor parte del tritio inyectado, por tanto, debe extraerse de la superficie y del interior de los miles de subsistemas del reactor y volver a inyectarse de 10 a 20 veces antes de consumirse totalmente. Si no se recupera y reinyecta tan solo el 1 % del tritio no consumido, ni siquiera el mayor excedente del proceso de regeneración en el manto de litio puede compensar la pérdida de tritio. A título comparativo, en las dos instalaciones de fusión con confinamiento magnético en que se ha utilizado tritio (el reactor de fusión experimental *tokamak* de Princeton y el Joint European Torus), nunca se recuperó aproximadamente el 10 % del tritio inyectado.

Para cubrir los inevitables déficit de recuperación del tritio no consumido para su uso como combustible en un reactor de fusión, es preciso seguir utilizando reactores de fisión para producir suficientes reservas de tritio, una situación que implica una dependencia perpetua con respecto a los reactores de fisión, con todos sus problemas de seguridad y de proliferación nuclear. Dado que la producción externa de tritio es carísima, es probable que desde el punto de vista de la disponibilidad de combustible solo serán viables los reactores de fusión alimentados exclusivamente con deuterio. Esta circunstancia agrava el problema de la proliferación nuclear que se abordará más adelante.

### **Enorme consumo de electricidad parasitaria**

Además del problema del combustible, los reactores de fusión se enfrentan a otra dificultad: consumen buena parte de la misma energía que producen, o lo que en el sector de generación eléctrica se denomina *pérdida de electricidad parasitaria*, de una magnitud desconocida en cualquier otra fuente de energía eléctrica. Los reactores de fusión han de soportar dos clases de pérdidas de electricidad parasitaria: en primer lugar, es preciso mantener continuamente, incluso cuando el plasma de fusión no está operativo (es decir, durante desconexiones previstas o imprevistas), una multitud de sistemas auxiliares esenciales externos al reactor. Continuosamente se consumen de 75 a 100 MWe (megavatios eléctricos) en refrigeradores de helio líquido, bombas de agua, bombas de vacío, calefacción, ventilación y aire acondicionado para numerosos edificios; en el procesado de tritio, etc., como muestran las instalaciones del proyecto de fusión ITER en Francia. Cuando se interrumpe el proceso de fusión por cualquier motivo, esta energía debe adquirirse de la red regional a precio minorista.

La segunda categoría de pérdida parasitaria es la electricidad necesaria para controlar el plasma de fusión en los sistemas de fusión por confinamiento magnético (y para encender las cápsulas de combustible en los sistemas de fusión por confinamiento inercial pulsado). Los plasmas de fusión por confinamiento magnético exigen la inyección de una cantidad significativa de electricidad en haces atómicos o energía electromagnética para estabilizar el proceso de fusión, mientras las bobinas magnéticas que ayudan a controlar la ubicación y estabilidad del plasma consumen electricidad adicional. La pérdida total de energía eléctrica con este fin asciende por lo menos al 6 % de la energía de fusión generada, y la energía eléctrica requerida para bombear el refrigerante del manto suele ser del

2 % de la energía de fusión generada. La cantidad bruta de energía eléctrica producida puede ser del 40 % de la energía de fusión, de manera que la energía circulante asciende a alrededor del 20 % de la energía eléctrica producida.

En la fusión por confinamiento inercial y en los reactores híbridos de fusión por confinamiento inercial/magnético, después de cada pulso de fusión, la corriente eléctrica ha de cargar los sistemas de almacenamiento energético como los bancos de capacitores que alimentan los rayos láser o iónicos o las fundas de implosión. La demanda de energía circulante es por lo menos similar a las de la fusión por confinamiento magnético.

Las pérdidas de energía descritas más arriba se restan de la energía eléctrica producida por el reactor y determinan los límites inferiores del tamaño de los reactores. Si la potencia de fusión es de 300 megavatios, la producción eléctrica de 120 MWe apenas cubre las necesidades de la propia instalación. A medida que se incrementa la energía de fusión, el consumo interno pasa a ser una proporción decreciente de la producción eléctrica, descendiendo a la mitad cuando la energía de fusión es de 830 megavatios. Para tener alguna posibilidad de operar económicamente y cubrir la devolución del capital invertido y los costes de explotación, la energía de fusión deberá incrementarse a miles de megavatios, de manera que la pérdida total de energía parasitaria resulte relativamente pequeña. En suma, por debajo de un determinado tamaño (alrededor de 1.000 MWe), la pérdida de energía parasitaria hace que resulte antieconómico operar una central eléctrica de fusión.

Los problemas de la pérdida de electricidad parasitaria y de reposición del combustible son en sí mismos significativos. Pero los reactores de fusión encierran otros problemas graves que actualmente también afligen a los reactores de fisión, incluidos los daños por radiación de neutrones y los residuos radiactivos, la carga de los recursos de refrigeración, los costes de explotación exorbitantes y los mayores riesgos de proliferación de armas nucleares.

### **Daños por radiación y residuos radiactivos**

Para producir calor utilizable, los chorros de neutrones que transportan el 80 % de la energía de fusión de deuterio-tritio deben desacelerarse y refrigerarse dentro de la estructura del reactor, en el manto que lo rodea, que contiene litio, y con ayuda del refrigerante. Se considera que los daños por radiación de neutrones en la pared de la vasija sólida serán peores que en los reactores de fisión, debido a las mayores energías de los neutrones. Los neutrones procedentes de la fusión expulsan los átomos de su habitual posición reticular, provocando la hinchazón y fracturación de la estructura. Asimismo, las reacciones inducidas por los neutrones generan grandes cantidades de helio e hidrógeno intersticial, formando bolsas de gas que agravan la hinchazón, la fragilización y la fatiga. Estos fenómenos constituyen un peligro para la integridad de la vasija del reactor.

En los reactores alimentados exclusivamente con deuterio (que es más difícil de hacer reaccionar que una mezcla de deuterio-tritio), el producto de reacción tiene una energía cinco veces menor y los chorros de neutrones son sustancialmente menos dañinos para las estructuras. No obstante, sus efectos nocivos serán igual de ruinosos en un plazo más largo.

El problema de la degradación de la estructura por los neutrones puede mitigarse en determinados reactores de fusión en los que la cápsula del combustible de fusión está encerrada en una esfera o cilindro de litio líquido de un metro de grosor. Sin embargo, los sistemas de combustible se convertirán en toneladas de residuos radiactivos que deberán extraerse cada año de cada reactor. El litio fundido también encierra un peligro de incendio y explosión, una dificultad propia, asimismo, de los reactores de fisión de metal líquido.

El bombardeo de los neutrones de fusión expulsa los átomos de sus posiciones estructurales, convirtiéndolos en

radiactivos y debilitando la estructura, que debe renovarse periódicamente. Esto da lugar a enormes cantidades de material radiactivo que finalmente tiene que transportarse al exterior para su enterramiento. Muchos componentes no estructurales del interior del contenedor de reacción y del manto también se volverán altamente radiactivos a causa de la activación por los neutrones. Pese a que el grado de radiactividad por kilogramo de residuos sería mucho menor que en el caso de los residuos de reactores de fisión, el volumen y la masa de los mismos serían muchas veces más grandes. Es más, parte del daño por radiación y de la generación de residuos radiactivos tiene lugar inútilmente, pues una proporción de la energía de fusión se crea exclusivamente para compensar el consumo de energía en la propia central.

Los científicos de materiales tratan de desarrollar aleaciones estructurales de baja activación que permitan calificar los desechos de los reactores de residuos radiactivos de baja actividad y enterrarlos a baja profundidad. Por mucho que tales aleaciones estén alguna vez disponibles a escala comercial, muy pocos municipios o comarcas están dispuestas a aceptar vertederos para residuos radiactivos de baja intensidad. En cada país no existen más que uno o dos de tales cementerios, lo que significa que los residuos radiactivos de los reactores de fusión tendrían que transportarse de un lado a otro del territorio a un coste elevado y bajo vigilancia para impedir su desvío.

Para reducir la exposición del personal de la central a la radiación se requerirá un blindaje biológico incluso cuando el reactor no esté funcionando. En el entorno altamente radiactivo se precisarán equipos de control remoto y robots para todas las labores de mantenimiento en componentes de los reactores y para su sustitución por causa de los daños por radiación, la erosión de partículas o la fusión. Estos trabajos darán lugar a largos parones incluso para reparaciones menores.

### **Proliferación de armas nucleares**

En un reactor de fusión es posible producir -abierto o clandestinamente- plutonio 239 colocando simplemente óxido de uranio natural o desgastado en algún lugar en que estén circulando neutrones con cualquier nivel de energía. El océano de neutrones en desaceleración que resulta de la dispersión de los neutrones liberados en el proceso de fusión en el contenedor de reacción invade todos los recovecos del interior del reactor, incluidos los accesorios del contenedor. Los neutrones más lentos serán absorbidos fácilmente por el uranio 238, cuya sección transversal de absorción aumenta a medida que decrece la energía de los neutrones.

Vistas las dudosas perspectivas de reposición del tritio, puede que los reactores de fusión tengan que operar con las dos reacciones deuterio-deuterio que tienen sustancialmente la misma probabilidad, una de las cuales produce neutrones y helio 3, mientras que la otra genera protones y tritio. Dado que no hace falta reponer tritio, todos los neutrones de fusión están disponibles para cualquier fin, incluida la producción de plutonio 239 a partir de uranio 238.

Es sumamente difícil acercarse al punto de equilibrio energético con las reacciones deuterio-deuterio, porque su reactividad total es 20 veces más reducida que la de deuterio-tritio, incluso a temperaturas más elevadas. Ahora bien, un reactor experimental a base de deuterio de 50 megavatios de potencia de calefacción que produzca tan solo 5 megavatios de energía de fusión deuterio-deuterio podría generar unos 3 kilogramos de plutonio 239 en un año, absorbiendo en uranio 238 únicamente un 10 % de los neutrones generados. La mayor parte del tritio de la segunda reacción deuterio-deuterio podría recuperarse y quemarse, y los neutrones de deuterio-tritio producirán aún más plutonio 239, hasta un total de quizás 5 kilogramos. En efecto, el reactor transforma la energía eléctrica alimentada en neutrones *libres* y tritio, de manera que un reactor de fusión que funciona exclusivamente con deuterio puede ser un instrumento especialmente peligroso para la proliferación nuclear.

Un reactor alimentado con deuterio-tritio o con deuterio exclusivamente tendrá unas reservas de muchos kilogramos de tritio, ofreciendo la oportunidad de desviarlas para su uso en armamento nuclear. Del mismo modo que en el

caso de los reactores de fisión, se requerirá la vigilancia por parte de la Agencia Internacional de Energía Atómica para impedir que se produzca plutonio o se desvíe tritio.

### Inconvenientes adicionales comunes con los reactores de fisión

Se dispersará tritio sobre las superficies del contenedor de reacción, los inyectores de partículas, los conductos de bombeo y otros accesorios. La corrosión del sistema de intercambio de calor o la rotura de uno de los conductos de vacío del reactor podrían dar lugar a la fuga de tritio radiactivo a la atmósfera o a los recursos hídricos locales. El tritio reacciona con hidrógeno, produciendo agua tritiada, que es biológicamente peligrosa. La mayoría de reactores de fisión contienen cantidades insignificantes de tritio (menos de 1 gramo), frente a los kilogramos de los eventuales reactores de fusión. Sin embargo, incluso la fuga de cantidades mínimas de tritio de los reactores de fisión al agua subterránea provoca alarma social.

Impedir que el tritio atraviese ciertas clases de sólidos sigue siendo un problema irresuelto. Durante algunos años, la Administración Nacional de Seguridad Nuclear -perteneciente al Ministerio de Energía de EE UU- estuvo produciendo tritio en por lo menos un reactor de fisión, perteneciente a la Administración del Valle de Tennessee, mediante la absorción de neutrones en varillas de control que contenían litio. Hubo fugas significativas y por lo visto imposibles de reducir de tritio de las varillas al agua de refrigeración del reactor, que se libera al medio ambiente, hasta el punto de que la producción anual de tritio se ha recortado drásticamente.

Además, hay problemas en relación con las exigencias relativas al producto refrigerante y la escasa eficiencia del agua. Un reactor de fusión es una central eléctrica térmica que requerirá una enorme cantidad de agua para el circuito de refrigeración secundario, que genera vapor, y para eliminar el calor de otros subsistemas del reactor, como refrigeradores criogénicos y bombas. Es más, los varios cientos de megavatios o más de electricidad térmica que habrá que generar tan solo para cubrir las dos clases de pérdidas de electricidad parasitarias requerirá cantidades adicionales de agua de refrigeración, que no es el caso de cualquier central termoeléctrica de otro tipo. De hecho, un reactor de fusión tendría la menor eficiencia del agua de todos los tipos de centrales termoeléctricas, sean de energía fósil o nuclear. Dadas las condiciones de sequía que se intensifican en diversas regiones del mundo, muchos países no podrían mantener físicamente grandes reactores de fusión.

Se han estudiado numerosos refrigerantes alternativos para el circuito primario de extracción de calor, tanto para reactores de fisión como para los de fusión, y tal vez se precisen muros de litio líquido de un metro de grosor para asegurar el confinamiento inercial y resistir la carga de impulsos. Sin embargo, en los reactores de fisión comerciales se ha utilizado casi exclusivamente agua durante los últimos 60 años, incluidos todos los que están construyéndose actualmente en el mundo. Este hecho indica que la aplicación de cualquier sustituto del refrigerante a base de agua, como helio o metal líquido, será irrealizable en los sistemas de fusión con confinamiento magnético. Y todo lo anterior implica que cualquier reactor de fusión tendrá que afrontar unos costes desorbitados.

El funcionamiento de un reactor de fusión exigirá contar con personal cuya experiencia se base en el trabajo en centrales de fisión, como expertos en seguridad para supervisar los sistemas de prevención y trabajadores especializados para manipular los residuos radiactivos. También se requerirá personal cualificado para hacer funcionar los subsistemas más complejos de un reactor de fusión, como el sistema criogénico, el procesado del tritio, los equipos de calentamiento del plasma y la elaboración de diagnósticos. Los reactores de fisión en EE UU requieren normalmente por lo menos 500 empleados permanentes en cuatro turnos semanales, y los reactores de fusión precisarán más bien un millar. En cambio, para el funcionamiento de una central hidroeléctrica o de gas natural, turbinas eólicas, huertas solares y otras fuentes de energía solo se precisa un puñado de personas.

Otro coste de explotación gravoso será el correspondiente a los 75 a 100 megavatios de corriente eléctrica parasitaria consumida de modo continuo en las instalaciones auxiliares, energía que habrá que adquirir de la red

regional cuando el reactor de fusión no esté en funcionamiento.

Entre los múltiples costes recurrentes se incluye el de la sustitución de los componentes dañados por la radiación y erosionados por el plasma en la fusión con confinamiento magnético, y el de la fabricación de millones de cápsulas de combustible al año para cada reactor de fusión con confinamiento inercial. Y toda central nuclear de cualquier tipo debe asegurar la financiación del desmantelamiento al final de su vida útil y del vertido periódico de residuos radiactivos.

Es imposible que el coste de explotación de un reactor de fusión sea inferior al de un reactor de fisión, y por tanto el coste de inversión de un reactor de fusión viable tendrá que ser casi nulo (o estar copiosamente subsidiado) en lugares en que el coste de explotación de los reactores de fisión no es competitivo frente a la electricidad generada a base de energía no nuclear, y en los que por tanto se ha procedido al cierre de centrales nucleares.

Para resumir, los reactores de fusión se enfrentan a algunos problemas específicos: la falta de combustible disponible en la naturaleza (tritio) y pérdidas de energía eléctrica importantes, que no podrán reducirse y tendrán que compensarse. Dado que el 80 % de la energía en cualquier reactor que funciona con deuterio y tritio aparece en forma de flujos de neutrones, es inevitable que estos reactores compartan muchos inconvenientes con los reactores de fisión, incluida la producción de gran cantidad de residuos radiactivos y graves daños por radiación de los componentes del reactor. Estos problemas son endémicos de cualquier tipo de reactor de fusión alimentado con deuterio-tritio, de modo que el abandono del *tokamak* a favor de algún otro sistema de confinamiento no aportará solución alguna.

Si se logra que los reactores funcionen con deuterio solo, desaparece la necesidad de reponer el tritio y los daños por radiación de neutrones son menores. Sin embargo, los demás inconvenientes permanecen, aparte del hecho de que los reactores que funcionan exclusivamente con deuterio incrementarán mucho el potencial de proliferación de armas atómicas. Estos impedimentos, junto con el colosal desembolso de capital y otras desventajas adicionales, comunes con los reactores de fisión, harán que los reactores de fusión resulten más complejos de construir y operar -si alcanzan la viabilidad económica- que cualquier otro tipo de generador de energía eléctrica.

La dura realidad de la fusión desmiente la afirmación de sus defensores de que aportará "energía ilimitada, limpia, segura y barata". La energía de fusión terrestre no es la fuente energética ideal ensalzada por sus impulsores, sino todo lo contrario: hay que evitarla.

19/04/2017

---

### ¿Por qué la fusión?

*Robert J. Goldston*

El quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), de 2014, incluyó la publicación en internet de toda una serie de proyecciones de futuro, generadas por modeladores de energía y medio ambiente de todo el mundo. Si escogemos un conjunto de proyecciones -coordinadas a escala internacional- coherentes con un aumento de la temperatura de menos de 2 grados Celsius (3,6 grados Fahrenheit) por encima de la era preindustrial -el límite superior de los acuerdos de París sobre el clima- y promediamos las previsiones, obtendremos la proyección de la futura producción de electricidad que muestra el cuadro siguiente, donde las cifras indican la cantidad media de gigavatios eléctricos por año.



## La fusión nuclear: ¿energía del futuro?

Producción mundial media anual de electricidad según proyecciones del PICC en

Año	2020	2050	2100
Solar	30	650	3.720
Nuclear	400	1.120	2.230
Eólica	150	930	2.170
Biomasa	40	540	1.500
Hidroeléctrica	410	640	850
Carbón + petróleo	920	860	770
Gas	780	980	620
Geotérmica	30	84	100
Total	2.770	5.804	11.900

Esta proyección media, elaborada por el PICC, se basa en gran medida en la energía solar y la eólica, que varían mucho a lo largo del día y según la estación del año. Para cuando estas fuentes de energía intermitentes pasen a ser dominantes, más adelante en este siglo, es muy posible que hayamos desarrollado la capacidad de mitigar su variación diaria mediante dispositivos de acumulación. La variación estacional, en cambio, es cientos de veces más difícil de compensar y resulta complicado imaginar cómo se puede hacer esto efectivamente. A medida que se

expandan las fuentes solares y eólicas, tendrán que ocupar lugares con mayor variabilidad, y cuanto pasen a ser una parte importante de la oferta energética, más adelante en este siglo, los costes asociados a su variabilidad aumentarán.

La proyección del PICC también atribuye un gran potencial a la energía de fisión nuclear, que conlleva los consabidos riesgos asociados a la seguridad, el almacenamiento de los residuos y la proliferación de armas nucleares. Más adelante en este siglo, esta previsión habrá supuesto el agotamiento de todos los recursos de uranio identificados, predichos y especulativos de que se ha informado en todo el mundo. Aunque tal vez se tornen disponibles otros recursos, esta magnitud del uso de uranio, combinada con su distribución desigual, dará pie probablemente al aumento del uso de tecnologías de reprocesado y del plutonio como combustible, incrementando significativamente los riesgos de proliferación. Otro motivo de preocupación es la necesidad implícita de espacios geológicos de almacenamiento de residuos en ausencia de un reprocesado, a cuyo efecto se prevén alrededor de 50 instalaciones con la capacidad de Yucca Mountain.

La biomasa, aunque algo menor que los demás recursos enumerados, también es importante porque se supone que representará un sumidero neto de dióxido de carbono. La vegetación extrae carbono de la atmósfera cuando crece, y si es posible capturar y almacenar gran cantidad del CO<sub>2</sub> generado con su combustión, entonces el conjunto del sistema constituye un sumidero neto. Sin embargo, la biomasa contemplada en la proyección del PICC requiere utilizar una extensión de terreno igual a alrededor del 75 % de todas las tierras empleadas actualmente para la agricultura, en un tiempo en que se prevé que el consumo de alimentos se duplique con creces y aumente la competencia por el agua. La enormidad del volumen de CO<sub>2</sub> procedente de la biomasa que habría que secuestrar del medio ambiente -durante cientos de años, en condiciones geológicas variables- va mucho más allá de nuestra experiencia. La posibilidad de quemar carbón, petróleo y gas en el futuro también dependerá de la captura y almacenamiento de carbono a escala masiva en toda una serie de situaciones geológicas.

En resumen, la energía solar y la eólica tienen una limitación común en la mayor parte del planeta: su variabilidad estacional. A su vez, la biomasa, el carbón, el petróleo y el gas comparten un riesgo común: la posibilidad práctica de captura y almacenamiento a gran escala del carbono en todo el mundo. Y la fisión nuclear comporta riesgos asociados a la seguridad, los residuos radiactivos y la proliferación nuclear. Todas estas fuentes de energía deben seguir estudiándose intensamente para determinar hasta qué punto es posible superar sus limitaciones, riesgos y problemas a la escala sin precedentes requerida.

En cambio, la energía de fusión puede ofrecer una alternativa atractiva. La fusión es una fuente de energía continua; no plantea los mismos problemas de seguridad, residuos y proliferación que la fisión; no requiere un uso desproporcionado de tierras de cultivo; y no depende de las posibilidades de captura y almacenamiento del carbono. La fusión podrá estar disponible más adelante en el siglo, pues la generación eléctrica tendrá que duplicarse entre 2050 y 2100 y la escala de la misma agudizará los problemas propios de otras fuentes de energía.

¿Qué es lo que determina el calendario para el desarrollo de la fusión? Hasta hace poco, la respuesta era: la ciencia. El gas supercaliente, llamado plasma, que requiere la fusión, es complicado, y los científicos han necesitado tiempo para comprender su comportamiento. En este tiempo hemos dado grandes pasos adelante. En estos momentos somos capaces de calcular, predecir y controlar aspectos clave del comportamiento de los plasmas de fusión. Sabemos cómo calentar plasmas a la temperatura de fusión, sabemos cómo los plasmas confinan el calor introducido en ellos y sabemos cómo escapa el calor. También sabemos cómo circula en precioso tritio que se utiliza para alimentar un sistema de energía de fusión, y hemos demostrado que los dispositivos de fusión con paredes metálicas retienen muy poca.

Hay margen para la innovación y la mejora, pero los elementos básicos del funcionamiento de un sistema de energía de fusión son conocidos. Ya hemos generado plasmas en los que introducimos 25 millones de vatios de potencia de

calefacción, obteniendo 16 millones de vatios de calor de fusión. Una asociación internacional en que participan China, Europa, India, Japón, Rusia, Corea del Sur y EE UU está construyendo el proyecto ITER en el sur de Francia, cuya finalidad es generar 500 millones de vatios de calor de fusión, diez veces el insumo de tan solo 50 millones de vatios de energía de calefacción. Para un sistema de energía de fusión práctico será necesario incrementar este factor de 10 a 25, debido a las ineficiencias de la conversión de electricidad en calefacción del plasma y, después, del calor de fusión en electricidad. Este paso se abordará en las primeras plantas piloto de fusión que seguirán al ITER.

¿Es justo preguntarse por qué no podemos disponer de la fusión antes? La respuesta es que estos sistemas son intrínsecamente grandes; no es posible experimentar con la física y la tecnología de fusión en un banco de pruebas de laboratorio y después producir sistemas de fusión masivamente, como se puede hacer con paneles solares. Por consiguiente, ahora que nos aproximamos a los sistemas a escala de central eléctrica, se trata de instalaciones de gran tamaño y de las primeras de su clase, y su construcción lleva tiempo. La única manera en que hemos logrado reunir los recursos económicos para construir el proyecto ITER pasaba por la colaboración internacional. Sin embargo, después del ITER, las siguientes instalaciones serán probablemente plantas piloto nacionales, que utilizarán la física y la tecnología desarrollada por el ITER para alimentar la red con electricidad neta (previa deducción de la energía requerida para hacer funcionar la planta). China, Europa y Corea del Sur ya cuentan con planes avanzados en este sentido. EE UU seguramente también. Estos planes permitirán situar la fusión en condiciones de apoyar el aumento de la producción mundial de electricidad de acuerdo con las necesidades.

Un autor ha cuestionado en estas páginas que la fusión pueda ser una fuente de energía atractiva. Por supuesto que la fusión no será la panacea, pero las preguntas formuladas por Daniel Jassby tienen respuestas. La fusión requerirá un sistema de refrigeración como todas las fuentes de energía basadas en calor, es decir, la biomasa, el carbón y la fisión, por ejemplo. Es más, los sistemas de fusión consumirán una parte de la energía que produzcan ellos mismos para seguir funcionando, como cualquier sistema energético dotado de un equipo de captura y almacenamiento del carbono, que consume una parte significativa de la electricidad que produce para que funcione dicho equipo. Algunos diseños de centrales de fusión utilizan plomo líquido de refrigerante, que es mucho más eficiente que el agua y el vapor, lo que permite reducir el consumo de energía de refrigeración para producir una determinada cantidad de electricidad.

Sin duda los neutrones de fusión dañarán los componentes internos más cercanos al plasma. En las primeras plantas piloto de fusión, los materiales situados en las zonas de máximo flujo de neutrones tenderán que sustituirse cada 6 a 12 meses de funcionamiento a pleno rendimiento. Existe la posibilidad de emplear nuevos materiales nanoestructurados que son más resistentes a los neutrones. Estos podrán desarrollarse y aprobarse para su aplicación en la fusión mediante simulaciones por ordenador y pruebas a pequeña escala, así como en pruebas en las propias plantas piloto y en las posteriores fuentes de energía de fusión, como se hizo con la fisión. La fusión generará residuos nucleares, pero el periodo de desintegración de los mismos se contará en decenios, no en milenios. Los neutrones de fusión podrán utilizarse, en principio, para producir combustible para armas, pero dado que no debería haber materiales de este tipo en una planta de energía de fusión, esto se detectaría y disuadiría de forma mucho más directa, en comparación con los reactores de fisión, en los que la producción de grandes cantidades de material utilizable para armas es inherente al proceso.

Las primeras centrales eléctricas de fusión serán caras, pero cabe esperar que a medida que madure la tecnología, los costes se reducirán. Las principales cuestiones de seguridad que con el tiempo han disparado los costes de las centrales de fisión nuclear no se dan en el caso de la fusión. En suma, aunque la energía de fusión no sea una panacea, tiene el potencial de ser una fuente energética atractiva que podrá desarrollarse a medida que crezcan los problemas con las fuentes de energía existentes.

Es una buena señal que una serie de empresas de nueva creación inviertan ahora en la tecnología de fusión. Están buscando avances decisivos para la energía de fusión, y todo avance decisivo, científico o tecnológico, será bienvenido, por no hablar de las posibles contribuciones del amplio abanico de estudios científicos que apoyan. Sin

embargo, no es muy probable que estas pequeñas empresas privadas de capital de alto riesgo logren su objetivo antes que la amplia comunidad científica mundial abierta. Las empresas de capital riesgo suelen generar beneficios mediante el apoyo a múltiples proyectos de alta rentabilidad, pero de baja probabilidad. En todo caso, la iniciativa anunciada recientemente de una empresa privada asociada al Massachusetts Institute of Technology será posiblemente muy beneficiosa, porque puede abrir la puerta a la reducción del tamaño de los sistemas de energía de fusión a la luz de los resultados del ITER, gracias a una tecnología magnética más avanzada, basada en nuevos superconductores de alta temperatura.

Así, ¿cuál es la respuesta a la pregunta de "¿Por qué la fusión?"? La elección de las fuentes de energía que nutrirán el desarrollo humano a lo largo de este siglo es sumamente importante. Y el coste del desarrollo de la fusión es mínimo en comparación con la economía energética mundial. Es, en efecto, mucho más bajo que el importe de los subsidios que pagan los Estados a las fuentes de energía existentes. La fusión debería desarrollarse como alternativa práctica y atractiva, para estar disponible a gran escala cuando otras fuentes de energía afronten importantes limitaciones, riesgos y problemas que pueden constreñir su crecimiento. Debemos a nuestros hijos y nietos tanto la oportunidad de continuar con el desarrollo humano basado en el acceso a la energía, como la conservación del mismo encantador planeta verde que nosotros heredamos de nuestros padres y abuelos.

09/04/2018

---

### ITER es un escaparate... de los problemas de la energía de fusión

*Daniel Jassby*

Hace un año escribí una crítica de la fusión como fuente de energía, titulada "Reactores de fusión: no son lo que prometían ser". Aquel artículo generó mucho interés, a juzgar por el centenar largo de comentarios de lectores a que dio lugar. Ahora me han pedido que escriba un nuevo artículo para proseguir con la conversación con los lectores del *Bulletin*. Permítanme, de todos modos, que ponga en antecedentes a quienes acaban de entrar en la sala.

Soy físico investigador y he trabajado en experimentos de fusión nuclear durante 25 años en el laboratorio de física del plasma de la Universidad de Princeton en Nueva Jersey. Mis investigaciones se han centrado en los ámbitos de la física del plasma y de la producción de neutrones relacionada con la investigación y desarrollo en materia de energía de fusión. Ahora que me he jubilado, he comenzado a contemplar el conjunto del proyecto de fusión de forma más desapasionada, y me parece que el funcionamiento diario de un reactor de fusión comercial creará más problemas que los que podría resolver.

Así que me siento obligado a desmentir algunas de las exageraciones llamativas que se han formulado en relación con la energía de fusión, que durante mucho tiempo se ha ensalzado regularmente como la fuente energética *perfecta* y presentado a menudo como la solución mágica de los problemas energéticos del mundo. En el artículo del año pasado hice hincapié en que las virtudes continuamente proclamadas de la perfección energética (casi siempre *inagotable, barata, limpia, segura y libre de radiaciones*) vienen desmentidas por la cruda realidad, y que un reactor de fusión se situará en verdad más bien en el lado opuesto de una fuente energética ideal. Sin embargo, esa discusión sacaba a colación, en gran medida, las dificultades de la concepción de los reactores de fusión, que sus defensores consideran que algún día se solventarán.

Ahora, sin embargo, estamos por primera vez en condiciones de estudiar un prototipo de reactor de fusión en el mundo real: el Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER) que se está construyendo en Cadarache, Francia. A pesar de que su funcionamiento efectivo todavía tardará años en llegar, el proyecto ITER está suficientemente avanzado para que podamos examinarlo como ejemplo del diseño en forma de rosquilla conocido por

el nombre de *tokamak*, el planteamiento más prometedor para lograr producir energía de fusión en la Tierra sobre la base del confinamiento magnético.

En diciembre de 2017, la dirección del proyecto ITER anunció que se había completado el 50 % de las obras de construcción. Este importante hito refuerza bastante la confianza en que finalmente pueda realizarse lo que será la única instalación terrestre que se parece, aunque sea remotamente, a lo que se supone que será un reactor de fusión operativo. Como escribió *The New York Times*, esta instalación "se construye para verificar un viejo sueño: que la fusión nuclear, la reacción atómica que tiene lugar en el Sol y en las bombas de hidrógeno, puede controlarse para generar electricidad".

Para los físicos especializados en plasma, el ITER es el primer dispositivo de confinamiento magnético que tal vez pueda demostrar un *plasma ardiendo*, en que el calentamiento con partículas alfa generadas en reacciones de fusión es el principal medio para mantener la temperatura del plasma. Esta condición exige que la energía de fusión sea por lo menos cinco veces mayor que la energía de calefacción externa aplicada al plasma. Aunque ninguna parte de esta energía de fusión se convertirá efectivamente en electricidad, el proyecto ITER se considera sobre todo un paso crucial en el camino hacia una central de energía de fusión operativa, y esta idea es la que aquí nos preocupa.

Veamos lo que cabe deducir con respecto a algunos problemas tal vez irremediables de los reactores de fusión a partir de la observación del proyecto ITER, centrándonos en cuatro ámbitos: consumo de electricidad, pérdidas de combustible tritio, activación de neutrones y demanda de agua de refrigeración.

### Un lema equivocado

En la página web del ITER te dan la bienvenida con la proclama de *energía ilimitada*, que es asimismo el grito de guerra de los entusiastas de la fusión en todas partes. Parece que el personal del proyecto ya no percibe la ironía de este lema y que el gran público ni siquiera la sospecha, pero quienquiera que haya hecho un seguimiento de las obras de construcción de la planta del ITER en los últimos cinco años -cosa que se puede hacer fácilmente sobre la base de las fotografías y descripciones detalladas que figuran en la página web del proyecto- se habrá quedado pasmado ante la enorme cantidad de energía invertida.

La página web alardea implícitamente de esta enorme inversión energética cuando califica cada uno de los subsistemas del ITER de ser *lo mejor* de su clase. Por ejemplo, el criostato, o refrigerador de helio líquido, es el recipiente de vacío de acero inoxidable más grande del mundo, mientras que el propio *tokamak* pesará tanto como tres torres Eiffel. El peso total de la instalación central del ITER es de unas 400.000 toneladas, de las que los componentes más pesados, con 340.000 toneladas, son los cimientos y los edificios del complejo del *tokamak*, y con 23.000 toneladas el propio *tokamak*.

Sin embargo, los impulsores deberían estar más bien desconsolados en vez de eufóricos, pues lo mejor y lo más grande comporta un gran desembolso de capital y una fuerte inversión de energía, que aparecerá en el lado negativo del balance energético de la operación. Y esta energía se ha generado en gran parte mediante combustibles fósiles, dejando una *huella de carbono* inimaginablemente grande para la preparación de la obra y la construcción de todas las instalaciones de apoyo, así como la del propio reactor.

En el lugar en que se hallará el reactor, grandes máquinas accionadas con combustibles fósiles excavan enormes volúmenes de tierra hasta una profundidad de 20 metros; el hueco se rellena luego con incontables toneladas de hormigón. Algunos de los camiones más grandes del mundo (accionados con combustibles fósiles) transportan gigantescos componentes del reactor al lugar de ensamblaje. Se queman combustibles fósiles para extraer, transportar y refinar las materias primas necesarias para fabricar los componentes del reactor y tal vez para el propio

proceso de fabricación.

Cabe preguntarse cómo podría recuperarse alguna vez tanta energía gastada; desde luego que nunca. No obstante, la encarnación bien visible de la tremenda inversión energética no es más que el primer elemento de la irónica *energía ilimitada*.

Adyacente a estos edificios se encuentra una planta de distribución eléctrica de más de 40.000 metros cuadrados de extensión con grandes subestaciones que transmiten hasta 600 megavatios de electricidad, o MW(e), de la red eléctrica regional, lo suficiente para abastecer a una ciudad de tamaño medio. Esta potencia se requerirá para cubrir las necesidades operativas del ITER; nunca fluirá energía hacia el exterior, ya que la estructura interna del ITER impide convertir el calor de fusión en electricidad. No olvidemos que el ITER es una instalación de prueba, concebida exclusivamente para verificar una concepción de cómo los ingenieros pueden imitar los procesos internos del Sol para juntar átomos en el mundo real y de forma controlada; el ITER no está destinado a generar electricidad.

La subestación eléctrica por sí sola ya revela la enorme cantidad de energía que se requerirá para hacer funcionar el proyecto ITER, y lo mismo sucederá con cualquier central de fusión de gran tamaño. Como ya señalé en mi anterior artículo publicado en el *Bulletin*, los reactores de fusión y las instalaciones experimentales comportan dos clases de consumo de electricidad: en primer lugar, es preciso mantener continuamente en funcionamiento toda una serie de sistemas auxiliares imprescindibles, como criostatos, bombas de vacío y sistemas de calefacción, ventilación y refrigeración de edificios, incluso cuando no está en uso el plasma de fusión. En el caso del ITER, este consumo ininterrumpible de electricidad varía entre 75 y 110 MW(e), según escribieron J.C. Gascon y otros en su artículo "Design and Key Features for the ITER Electrical Power Distribution", publicado en enero de 2012 en *Fusion Science & Technology*.

La segunda clase de consumo de energía gira en torno al plasma propiamente dicho, que funciona de forma pulsátil. En el ITER se requerirán por lo menos 300 MW(e) durante decenas de segundos para calentar el plasma de reacción y establecer las corrientes de plasma necesarias. Durante la fase de funcionamiento, de 400 segundos de duración, se requerirán unos 200 MW(e) para mantener el proceso de fusión y controlar la estabilidad del plasma.

Durante los próximos ocho años de construcción y prueba de la instalación, el consumo de energía será en promedio como mínimo de 30 MW(e), que hay que sumar a la energía invertida y que anticipa el gasto energético ininterrumpible del ITER. Sin embargo, gran parte de la información sobre los consumos de energía -y la distinción entre la generación de calor esperada del ITER y la de electricidad- se ha escamoteado al presentar el proyecto al público.

### **Hablemos de energía**

Recientemente, la página web de *New Energy Times* presentó un informe muy documentado, titulado "The ITER power amplification myth", sobre el modo en que el departamento de comunicación de la instalación experimental difunde información mal redactada sobre el balance energético del ITER y confunde a los medios. Una típica afirmación muy divulgada es que "el ITER producirá 500 megavatios de energía, consumiendo para ello 50 megavatios", dando a entender que ambos números se refieren a energía eléctrica.

*New Energy Times* aclara que los 500 megavatios de producción esperados se refieren a energía de fusión (en forma de neutrones y rayos alfa), lo que no tiene nada que ver con energía eléctrica. El mencionado consumo de 50 MW se refiere a la energía de calefacción inyectada en el plasma para ayudar a mantener su temperatura y su corriente, y no es más que una pequeña fracción del total de energía eléctrica que consume el reactor. La cantidad total varía entre 300 y 400 MW(e), como ya se ha explicado más arriba.

La crítica técnica de *New Energy Times* es válida en lo esencial y llama la atención sobre la cantidad colosal de energía eléctrica requerida por una central de fusión. De hecho, siempre se ha admitido que para poner en marcha cualquier sistema de fusión se precisa muchísima energía. Además, los sistemas de fusión de tipo *tokamak* requieren constantemente cientos de megavatios de energía eléctrica tan solo para seguir funcionando. En lo que parece ser una respuesta a las críticas de *New Energy Times*, la página web del ITER y otras fuentes afines, como Eurofusion, han corregido algunas afirmaciones erróneas con respecto al flujo energético.

De todos modos, hay cuestiones mucho más graves en relación con el funcionamiento publicitado del ITER que la cuantificación engañosa de la energía de entrada y de salida prevista. Mientras que los 300 MW(e) de energía eléctrica y más son indiscutibles, una cuestión fundamental es si el ITER generará 500 MW de alguna cosa, una incógnita que gira en torno a ese combustible crucial que es el tritio: su abastecimiento, la voluntad de usarlo y la campaña requerida para optimizar su rendimiento. Otros malentendidos se refieren a la naturaleza real del producto resultante de la fusión.

### Tribulaciones en torno al tritio

El combustible más reactivo para la fusión es una mezcla a partes iguales de los isótopos de hidrógeno deuterio y tritio; este combustible (a menudo identificado por las letras D-T) genera una cantidad de neutrones cien veces mayor que la del deuterio solo y supone un incremento espectacular de las consecuencias radiactivas.

El deuterio abunda en el agua corriente, pero no existe ninguna fuente natural de tritio, un nucleido radiactivo con una semivida de tan solo 12,3 años. En la página web del ITER se afirma que el combustible tritio se obtendrá de "la reserva mundial de tritio". Esta reserva consiste en el tritio extraído del agua pesada de los reactores nucleares de tipo CANDU, situados principalmente en Ontario, Canadá, y también en Corea del Sur, con una posible fuente futura en Rumanía. La "reserva mundial" actual es de unos 25 kilogramos y aumenta alrededor de medio kilogramo cada año, señalan Muyi Ni y otros en su artículo "Tritium Supply Assessment for ITER", publicado en 2013 en *Fusion Engineering and Design*. Se prevé que esta reserva alcanzará su punto máximo en 2030.

Mientras que los defensores de la fusión hablan alegremente de la fusión de deuterio y tritio, de hecho se resisten a utilizar el tritio por dos razones: en primer lugar, porque es radiactivo y por tanto encierra un riesgo relacionado con su posible liberación al entorno. En segundo lugar, comporta la producción inevitable de materiales radiactivos, pues los neutrones de la fusión de D-T bombardean la vasija del reactor, lo que requiere reforzarla y dificulta por tanto el acceso con fines de mantenimiento, además de plantear problemas asociados al vertido de residuos radiactivos.

Durante 65 años de investigación con cientos de instalaciones, solamente dos sistemas de confinamiento magnético han utilizado tritio: el Tokamak Fusion Test Reactor en mi viejo y concurrido coto del laboratorio de física del plasma de Princeton, y el Joint European Torus (JET) de Culham, Reino Unido, en la década de 1990. Los planes actuales del ITER prevén la adquisición y el consumo de 1 kilogramo de tritio por lo menos cada año. Suponiendo que el proyecto ITER sea capaz de obtener un suministro suficiente de tritio y logra utilizarlo, ¿alcanzará realmente una producción de 500 MW de energía de fusión? Nadie lo sabe.

Se supone que el "primer plasma" se generará en el ITER en 2025. A esto le seguirá un decenio relativamente tranquilo de montaje continuado de maquinaria y periódicas operaciones con plasma a base de hidrógeno y helio. Estos gases no generan neutrones de fusión, por lo que permiten resolver problemas técnicos y optimizar el rendimiento del plasma con un mínimo riesgo de radiación. Es preciso mantener a raya las inestabilidades del plasma para asegurar un confinamiento suficiente de la energía, de manera que se pueda calentar y mantener a alta temperatura el plasma de reacción. Es preciso impedir los influjos de átomos no hidrogénicos.

El programa del ITER prevé comenzar con el uso de deuterio y tritio a finales de la década de 2030. No hay ninguna garantía de que se alcance el objetivo de los 500 MW; la posibilidad de generar grandes cantidades de energía de fusión depende, entre otras cosas, del desarrollo de una mezcla óptima de deuterio y tritio a inyectar mediante pellets congelados, chorros de partículas, ráfagas de gas y reciclado. Durante la inevitable fase de maduración a comienzos de la década de 2040, es probable que la energía de fusión producida por el ITER solo alcance una fracción de los 500 MW, y que será mayor el volumen de tritio inyectado que se pierda por falta de recuperación que el del tritio consumido para la combustión (es decir, para su fusión con deuterio).

Los análisis del proceso de combustión de D-T en el ITER indican que solo se consumirá el 2 % del tritio inyectado, de modo que el 98 % restante saldrá intocado del plasma de reacción. Mientras que gran parte simplemente saldrá junto con los residuos del plasma, habrá que recuperar continuamente mucho tritio de las superficies de la vasija de reacción, los inyectores de chorros, los conductos de bombeo y otros equipos, para su procesado y reutilización. Durante sus varias docenas de pasos por el *sendero de lágrimas* del tritio alrededor del plasma y los sistemas de vacío, reprocesado y alimentación, algunos átomos de tritio quedarán atrapados permanentemente en las paredes de la vasija y los componentes del interior de la misma, así como en los sistemas de diagnóstico y calentamiento del plasma.

La penetración de tritio a alta temperatura en muchos materiales es una cuestión que todavía no se comprende bien actualmente, como explican R. A. Causey y otros en "*Tritium barriers and tritium diffusion in fusion reactors*". La migración más profunda de una pequeña parte del tritio atrapado en las paredes y después en los conductos de refrigerante líquido y gaseoso será imposible de prevenir. La mayor parte de este tritio acabará desintegrándose, pero habrá emisiones inevitables al medio ambiente a través del agua de refrigeración circulante.

Los diseñadores de los futuros reactores *tokamak* tienen asumido en general que la totalidad del tritio consumido podrá reponerse mediante la absorción de los neutrones de fusión en el litio que rodea completamente el plasma de reacción. Incluso este sueño ignora totalmente el tritio que se perderá para siempre en su periplo a través de los subsistemas del reactor. Como demostrará el ITER, la cantidad total de tritio no recuperado puede llegar a ser igual que la cantidad consumida y solo podrá reponerse mediante la adquisición -a un precio elevado- de tritio generado en reactores de fisión.

### **Radiaciones y residuos radiactivos de la fusión**

Como se ha señalado más arriba, los 500 MW de energía térmica de fusión que supuestamente producirá el ITER no será energía eléctrica. Pero lo que los defensores de la fusión detestan explicar es que esta energía de fusión no es una radiación benigna como la solar, sino que consiste sobre todo (en un 80 %) en chorros de neutrones energéticos cuya única función aparente en el ITER será la de generar enormes volúmenes de residuos radiactivos a medida que bombardeen las paredes de la vasija del reactor y sus componentes asociados.

Apenas el 2 % de los neutrones serán interceptados por módulos de prueba para investigar la producción de tritio en litio, pero el 98 % de los flujos de neutrones chocarán simplemente contra las paredes del reactor o los dispositivos en los puertos de salida.

En los reactores de fisión, como máximo el 3 % de la energía de fisión se da en forma de neutrones. Sin embargo, el ITER se parece a un aparato eléctrico que convierte cientos de megavatios de energía eléctrica en chorros de neutrones. Una característica peculiar de los reactores de fusión que operan con D-T es que la parte preponderante de la energía térmica no se produce en el plasma de reacción, sino más bien dentro de la gruesa vasija de acero del reactor a medida que los chorros de neutrones chocan con ella y disipan gradualmente su energía. En principio, esta energía de neutrones termalizada podría reconvertirse en electricidad con una eficiencia muy baja, pero el proyecto ITER ha optado por evitar este reto. Es una tarea que se delega en engaños llamados reactores de demostración que



los defensores de la fusión esperan desplegar en la segunda mitad del siglo.

Un defecto reconocido desde hace tiempo de la energía de fusión es el de los daños producidos por la radiación de neutrones sobre los materiales expuestos, provocando hinchamiento, fragilidad y fatiga. El caso es que el tiempo total de funcionamiento con una elevada producción de neutrones en el ITER será demasiado corto para provocar ni siquiera el mínimo daño a la integridad de la estructura, pero las interacciones con los neutrones generarán de todos modos una peligrosa radiactividad en todos los componentes expuestos del reactor, produciendo finalmente nada menos que 30.000 toneladas de residuos radiactivos.

Alrededor del *tokamak* del ITER, un monstruoso cilindro de hormigón de 3,5 metros de grosor de pared, 30 metros de diámetro y 30 metros de altura servirá de blindaje para impedir la salida al exterior de rayos X, rayos gama y neutrones de fuga. La vasija del reactor y los componentes no estructurales del interior de la vasija y fuera de ella, hasta el blindaje de hormigón, se tornarán altamente radiactivos al activarse con los chorros de neutrones. Los periodos de inactividad con fines de mantenimiento y reparación serán prolongados porque todos los trabajos de mantenimiento deberán llevarse a cabo con equipos de control remoto.

Para el Joint European Torus en el Reino Unido, que es un proyecto experimental mucho más pequeño, el volumen previsto de residuos radiactivos asciende a 3.000 metros cúbicos, y el coste de su desmantelamiento y vertido superará los 300 millones de dólares, de acuerdo con *Financial Times*. Estas cantidades empujeñecen ante las 30.000 toneladas de residuos radiactivos del ITER. Por suerte, gran parte de esta radiactividad inducida se desintegrará en décadas, pero al cabo de 100 años unas 6.000 toneladas todavía serán peligrosamente radiactivas y tendrán que almacenarse en un depósito, según el capítulo sobre "Residuos y desmantelamiento" del informe de diseño definitivo del ITER.

El transporte periódico y el vertido de componentes radiactivos fuera de la central experimental, así como el desmantelamiento final de toda la instalación del reactor serán actividades que requerirán un gran consumo de energía, que habrá que sumar al lado negativo del balance energético del proyecto.

### El problema del agua

Se requerirán flujos torrenciales de agua para eliminar calor de la vasija del reactor del ITER, de los sistemas de calentamiento del plasma, de los sistemas eléctricos del *tokamak*, de los refrigeradores criogénicos y de los equipos de alimentación de energía de los imanes. Incluida la generación de energía de fusión, la carga térmica total podría ascender a 1.000 MW, pero incluso sin la producción de energía de fusión, la instalación del reactor consume hasta 500 MW(e), que finalmente se convierten en calor que habrá que extraer. El ITER demostrará que los reactores de fusión consumirían mucha más agua que cualquier otro tipo de generador de energía, debido al enorme gasto de energía parasitaria que se convierte en calor adicional que es preciso disipar. (Por *parasitaria* nos referimos al consumo de una parte de la energía que genera el propio reactor.)

El agua de refrigeración provendrá del Canal de Provence, formado mediante la canalización del río Durance, y la mayor parte del calor se descargará en la atmósfera mediante torres de refrigeración. Durante las operaciones de fusión, el caudal total de agua de refrigeración será de 12 metros cúbicos por segundo (720.000 litros por minuto), más de un tercio del caudal del canal. Este caudal de agua bastaría para abastecer a una ciudad de un millón de habitantes. (Aunque la demanda real de agua será una pequeña fracción de esa cantidad, ya que cada pulso generador del ITER durará apenas 400 segundos y se producirán a lo sumo 20 pulsos diarios; además, el agua de refrigeración del ITER se recirculará.)

Aunque el ITER no produzca otra cosa que neutrones, su caudal máximo de refrigerante equivaldrá a la mitad del

caudal que precisa una central térmica de carbón o una central nuclear que generen 1.000 MW(e) de energía eléctrica. En el ITER se consumirán nada menos que 56 MW(e) de energía eléctrica para accionar las bombas que harán circular el agua a través de unos 36 kilómetros de tuberías.

El funcionamiento de cualquier central de fusión nuclear grande como el ITER solo es posible en un lugar como el de la región de Cadarache en Francia, donde hay acceso a muchas redes eléctricas de alta potencia y a un sistema caudaloso de agua refrigerante. En las últimas décadas, la gran abundancia de caudales de agua dulce y la disponibilidad ilimitada de agua de mar fría han permitido poner en marcha un gran número de plantas termoeléctricas del orden de los gigavatios. Teniendo en cuenta la disponibilidad decreciente de agua dulce e incluso de agua de mar fría en todo el mundo, la dificultad de abastecimiento de agua refrigerante impedirá la proliferación de reactores de fusión.

### El impacto del ITER

Tanto si el rendimiento del ITER es bueno como si es malo, su legado más favorable será que, al igual que la Estación Espacial Internacional, habrá sido un ejemplo impresionante de cooperación internacional de décadas de duración entre naciones que mantienen entre sí relaciones amistosas o semihostiles. Los críticos censuran que esta colaboración internacional ha incrementado enormemente el coste y alargado los plazos, pero los 20.000 a 30.000 millones de dólares que costará el ITER no difieren mucho de lo que costarán otras instalaciones nucleares de gran tamaño, como las centrales cuya construcción se ha aprobado recientemente en EE UU (Summer y Vogtle) y Europa Occidental (Hinkley y Flamanville), así como el proyecto estadounidense de combustible nuclear MOX sobre el río Savannah. Todos estos proyectos han visto triplicar su coste, y sus plazos de construcción han pasado de años a décadas. El problema subyacente es que todas las instalaciones de energía nuclear, sean de fisión o de fusión, son extraordinariamente complejas y desorbitadamente caras.

Un segundo efecto valioso del ITER será su influencia definitiva en la planificación de las fuentes de energía. Si tiene éxito, el ITER permitirá a los físicos estudiar los plasmas de fusión de larga duración y alta temperatura. Pero como prototipo de generador de energía, el ITER causará estragos, manifiestamente, como fuente de neutrones alimentada con tritio generado en reactores de fisión, accionada con cientos de megavatios de electricidad de la red eléctrica regional y consumidora sin precedentes de recursos de agua refrigerante. Los daños causados por los neutrones se agravarán, mientras que las demás características se repetirán en cualquier reactor de fusión subsiguiente que pretenda generar electricidad suficiente para superar todos los consumos de energía señalados en este artículo.

A la vista de esta realidad, tal vez hasta los más entusiastas planificadores de la energía abandonen la fusión. En vez de anunciar el comienzo de una nueva era energética, es probable que el ITER desempeñe un papel análogo al del reactor reproductor rápido, cuyos problemas manifiestos dieron al traste con otra supuesta fuente de "energía ilimitada" y afianzaron el predominio de los reactores de agua ligera en el ámbito nuclear.

*Daniel Jassby* fue investigador principal del Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad de Princeton hasta 1999. *Robert Goldston* es profesor de Ciencias Astrofísicas de la Universidad de Princeton.

14/02/2018

Traducción: **viento** sur

<https://thebulletin.org/why-fusión11667>