



## **INVESTIGA I+D+i 2014/2015**

### **GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE "FUSIÓN NUCLEAR"**

**Texto de D. Juan A. Jiménez**

**Noviembre de 2014**

#### **Introducción**

La fusión termonuclear controlada es una de las escasas opciones energéticas con capacidad potencial de suministro a gran escala para el siglo XXI y el futuro más lejano.

Estimaciones razonables hacen pensar que la población mundial crecerá hasta alcanzar unos 10.000 millones de personas hacia mediados de este siglo.

En 1990, el consumo de energía primaria por habitante y año, en los países industrializados, fue de  $2.2 \times 10^{11}$  Julios, es decir 5.1 t.e.p. (toneladas equivalentes de petróleo) y 10 veces menos en los países en vías de desarrollo. Dependiendo de los escenarios considerados para la evolución de la demanda energética, el consumo de energía primaria mundial podría llegar a multiplicarse por dos o por tres en el año 2050.

Las fuentes de energía capaces de cubrir una parte sustancial de las necesidades energéticas previstas son las siguientes:

- Combustibles fósiles: principalmente el carbón, ya que las reservas de petróleo y de gas natural habrán disminuido considerablemente.
- Energía nuclear: fisión y fusión.
- Energías renovables: hidráulica, solar, eólica, maremotriz, geotérmica, biomasa, etc.

Los combustibles fósiles presentan problemas de contaminación ambiental, como lluvia ácida y exceso de CO<sub>2</sub>. Las energías renovables, aunque vayan cubriendo cada vez más necesidades energéticas, son fuentes dispersas y de baja concentración para usos industriales. Las centrales nucleares llevan asociadas el problema de almacenamiento de residuos radiactivos de alta activación. Se hace necesario desarrollar opciones energéticas nuevas prestando especial atención a los aspectos de seguridad, de impacto ambiental y económicos. La fusión termonuclear controlada constituye una de esas opciones, a pesar de que todavía haya que superar el problema de la complejidad tecnológica de los dispositivos para fusión. El enorme reto de la fusión es reproducir en la Tierra las reacciones que se producen en el interior de las estrellas. El objetivo es, por tanto, construir reactores de fusión capaces de satisfacer una parte sustancial de las necesidades energéticas del planeta a medio plazo y asegurarlas para el futuro restante de la humanidad.

## **La fusión nuclear**

Desde que los científicos se dieron cuenta por primera vez, en los años veinte del siglo pasado, cuál era el verdadero origen de la cantidad ingente de energía que emite el Sol, ha sido un sueño de la humanidad aprender a controlar esta fuente de energía en la Tierra. El hombre, en los años cincuenta del pasado siglo, ya produjo las primeras reacciones de fusión, aunque de forma incontrolada, mediante la famosa bomba de hidrógeno (bomba H).

Al inicio de los estudios de la fusión nuclear para la producción controlada de energía (también originados en esos mismos años cincuenta), se predijo que un reactor basado en la fusión podría entrar en funcionamiento en unos veinte años, pero esta estimación ha resultado demasiado optimista. Actualmente los conocimientos sobre esta fuente de energía son mucho más detallados lo que permite tener una mayor confianza en los plazos para el desarrollo de la fusión.

En las reacciones de fusión se unen (fusionan) núcleos de átomos ligeros liberando mucha energía en el proceso. Es un proceso contrario al de las reacciones nucleares de fisión (las que se producen en los actuales reactores nucleares) en el sentido de que, en la fisión, los núcleos de átomos pesados se dividen en núcleos atómicos más ligeros. Las reacciones de fusión en el Sol se producen principalmente entre isótopos de hidrógeno (protio, deuterio y tritio), particularmente protio, el isótopo del hidrógeno con un solo protón en su núcleo y que es el más abundante en la naturaleza. En el centro del Sol la

temperatura es de unos 15 millones de grados y la densidad de la materia es de unas 150 veces la del agua líquida. Estas condiciones tan extremas no se pueden reproducir fácilmente en los laboratorios terrestres. En la Tierra se han logrado alcanzar temperaturas de más de 150 millones de grados centígrados pero con densidades de hidrógeno menores que la del aire. En estas condiciones, la reacción de fusión más eficiente es la que se produce entre el deuterio (D) y el tritio (T) produciendo helio ( $^4\text{He}$ ) y un neutrón.

### **Los combustibles de la fusión: deuterio y tritio**

Podemos afirmar que los combustibles necesarios son abundantes. El deuterio forma parte del agua de mares y océanos y su extracción no presenta mayores problemas. El tritio, sin embargo, es un isótopo radiactivo del hidrógeno con un período de semidesintegración de 12,3 años. El producto de su desintegración es helio (concretamente  $^3\text{He}$ , el isótopo del helio menos abundante). Es por ello que el tritio no se encuentra disponible libremente en la naturaleza y hay que generarlo de forma artificial. Afortunadamente, los neutrones de alta energía que provienen de las reacciones de fusión se pueden utilizar para bombardear litio de modo que, mediante otra reacción nuclear, se genere tritio en el llamado manto fértil del reactor. Este manto fértil consta por tanto de una capa que contiene litio y que produce el tritio necesario para usarlo como combustible. Podemos observar que los productos de esta reacción de fusión son absolutamente inocuos por lo que el proceso es respetuoso con el medio ambiente al no producir gases contaminantes.

### **El plasma, el cuarto estado de la materia**

Cuando se calienta la materia a las temperaturas necesarias para que se produzcan las reacciones de fusión, esta ya no se encuentra en estado sólido, líquido o gaseoso, se encuentra en estado de plasma: el cuarto estado de la materia. Si calentamos un gas progresivamente llega un momento en el que los electrones de la corteza atómica tienen energía suficiente como para desligarse del núcleo y lo que se obtiene es un conjunto de partículas cargadas eléctricamente (iones y electrones). La mayor parte de la materia conocida en el universo se encuentra en estado de plasma. En la Tierra podemos encontrar plasmas de forma natural (auroras boreales, rayos) o creados por el hombre (tubos fluorescentes, arcos de soldadura). En fusión nuclear el interés se centra en los plasmas de muy alta temperatura. Debido a la necesidad de vencer la repulsión electrostática entre los núcleos que se quieren fusionar, es necesario comunicarles mucha energía; esto

se consigue calentándolos a elevadas temperaturas (fusión termonuclear).

## El confinamiento del plasma

El objetivo de la investigación en fusión nuclear es el contener (o "confinar") el plasma en una vasija (reactor) que soporte las elevadas temperaturas necesarias para la reacción. Además debe haber suficiente número de núcleos para que la probabilidad de colisión sea suficientemente elevada (densidad de partículas suficiente).

Si se logran mantener estas condiciones de densidad y temperatura durante un tiempo suficientemente largo como para que se produzca suficiente número de reacciones, entonces hemos conseguido alcanzar el confinamiento deseado - esta idea se expresa mediante el "criterio de Lawson":

$$n T \tau > \text{un cierto valor umbral}$$

$n T \tau$   
densidad | tiempo  
temperatura

## Métodos de confinamiento

### Gravitatorio

Es el único método que ya ha demostrado su eficacia al 100% y las estrellas son la prueba. En ellas se produce energía mediante reacciones de fusión, consiguiendo tiempos de confinamiento de miles de años. La fuerza gravitatoria es capaz de confinar las partículas en un espacio lo suficientemente restringido (aunque sea tan grande como una estrella) como para que se produzcan las reacciones de fusión. Sin embargo, resulta imposible aplicar este método en la tierra, ya que no conocemos ningún método para generar un campo gravitatorio suficientemente fuerte en el laboratorio.



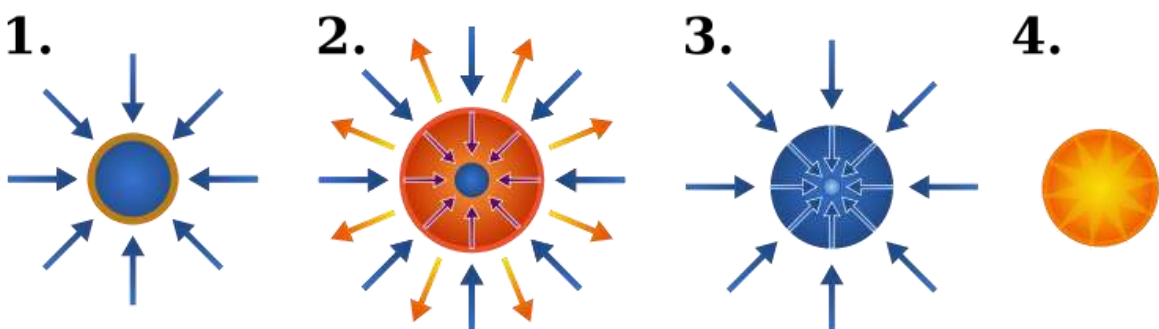
## Magnético

Es el método que hasta ahora ha dado mejores resultados en el laboratorio. Consiste en confinar las partículas en un espacio reducido (vasija magnética) mediante campos magnéticos muy intensos (unas 50 mil veces el campo magnético terrestre). El plasma se encuentra atrapado en el campo



magnético (en ocasiones se habla de trampa magnética) y esto es posible gracias a que las partículas del plasma están cargadas, lo que hace que el campo magnético sea capaz de ejercer una fuerza sobre ellas. En este sentido, el campo magnético es un sustituto del campo gravitatorio del método anterior. Los dispositivos de fusión por confinamiento magnético que más éxito han obtenido hasta la fecha tienen forma de toro (o donut). El hecho de que un plasma con geometría toroidal carezca de extremos (comparado con uno de geometría cilíndrica) hace que las pérdidas de partículas sean mucho menores. Los dos diseños principales de dispositivos experimentales para el estudio de plasmas de fusión mediante confinamiento magnético (*tokamak* y *stellarator*) son de geometría toroidal. La principal diferencia entre ambos diseños es que en el tokamak, una parte del campo magnético es generada por una corriente eléctrica que circula por el propio plasma. En el *stellarator*, todo el campo magnético es producido mediante corrientes en bobinas externas al plasma. En el confinamiento magnético, el tiempo de confinamiento depende, entre otros factores, de la intensidad del campo magnético y del tamaño de la vasija donde se encuentra el plasma.

## Inercial



En este método de confinamiento, en un primer lugar se produce el calentamiento de la superficie de una pequeña cápsula con el combustible (D-T) que se encuentra a muy baja temperatura (para aumentar la densidad). El calentamiento se puede producir por diversos métodos, por ejemplo, luz láser de alta intensidad (paso 1). La evaporación súbita (ablación) de la capa superficial de la cápsula crea una onda de choque hacia afuera y también hacia el interior de la cápsula (paso 2). La onda de choque comprime enormemente el combustible confinándolo en un espacio lo más reducido posible (paso 3), desencadenando así la reacción de fusión. Una vez iniciada la reacción de fusión, se deja explotar el combustible y se recoge la energía producida (paso 4). En este caso, el tiempo de confinamiento está determinado por la inercia de la materia al expandirse después de la compresión, de ahí el nombre 'inercial'. En la fusión por confinamiento inercial, por su naturaleza "explosiva" el tiempo de confinamiento es el menor de los tres métodos.

### **La fusión nuclear: ventajas e inconvenientes**

La fusión como método de generación de energía tiene importantes ventajas medioambientales y de seguridad. Ya que la reacción de fusión no es una reacción en cadena, no es posible que se pierda el control de la misma. En cualquier momento se puede parar la reacción, cerrando sencillamente el suministro de combustible. La materia para el combustible (deuterio y litio), se encuentra ampliamente disponible en cualquier parte del planeta, y hay suficiente materia para la generación de energía durante millones de años. Además, la fusión no produce gases que contribuyan al efecto invernadero. La reacción en sí sólo produce helio, un gas no nocivo más ligero que el aire, y por ello usado para hinchar globos.

Un aspecto de seguridad al que hay prestar especial atención en un reactor de fusión es la presencia de uno de los reactivos: el tritio, gas radioactivo. Debido a que se puede producir *in situ*, no hay necesidad de transportes de material radioactivo desde el exterior hacia el reactor. La cantidad de tritio que se necesita en cada momento es muy pequeña, así que una central eléctrica de fusión nunca contendría una gran cantidad del mismo.

Otro aspecto a tener en cuenta es la activación de los materiales que componen la pared interior del reactor de fusión. Los materiales expuestos al bombardeo de neutrones de alta energía provenientes de las reacciones que ocurren en el plasma se vuelven radioactivos (se

activan) después de un tiempo. Esto representa un problema a la hora de dismantelar la planta. Sin embargo, se espera que los materiales estructurales que se investigan en la actualidad tengan unos niveles de radiactividad despreciables pasados unos cien años desde el apagado, de tal modo que los reactores de fusión no supondrán una carga para las generaciones futuras.

## **La investigación en fusión nuclear: dispositivos experimentales**

La meta de la investigación internacional en el campo de la fusión es diseñar un prototipo de central de generación de energía de fusión, que cumpla con los requisitos de la sociedad: a saber, que sea seguro, fiable, sostenible, sin dañar el medioambiente y económicamente viable. Desde los años 50 se lleva avanzando en cuanto al conocimiento científico y técnico necesario en este campo. Durante estos años se ha multiplicado por 10.000 el rendimiento de los plasmas de fusión confinados magnéticamente.

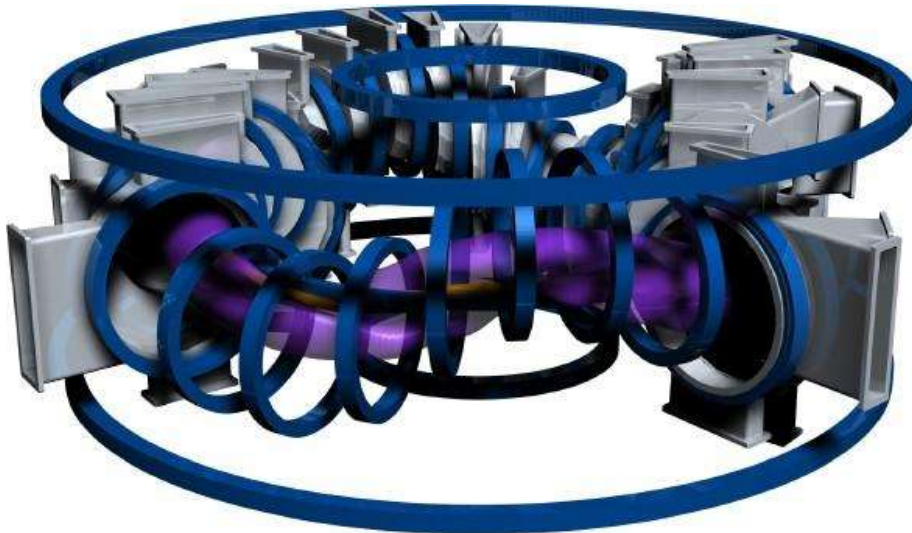
El experimento JET (Joint European Torus), cerca de Oxford en el Reino Unido, es actualmente el mayor experimento de fusión en el mundo y pertenece a la Unión Europea. El JET es una instalación única capaz de funcionar con los combustibles de las futuras centrales de fusión, deuterio y tritio, y presenta el record en la producción de energía mediante reacciones de fusión habiendo alcanzado una potencia de 16,1 MW en el año 1991.

El próximo dispositivo que representará un nuevo salto cualitativo es el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), un reactor experimental de tipo tokamak cuya meta es demostrar la viabilidad técnica y científica de un reactor de fusión. Se prevé que ITER produzca plasmas que generen una potencia de 500MW, diez veces la potencia suministrada. En el ITER, también se harán experimentos para probar componentes y tecnologías que son esenciales para una futura central de fusión industrial.

El ITER entrará en funcionamiento a comienzos de la próxima década y su coste de construcción se eleva a unos 15 mil millones de euros. Los actuales socios del proyecto ITER, de escala mundial, son la Unión Europea, Japón, China, la Federación Rusa, India, los Estados Unidos de América y Corea del Sur. Dentro del proyecto, Europa ocupa un puesto de liderazgo.

El paso siguiente a ITER será DEMO, una planta demostrativa de la producción de energía eléctrica basada en la fusión nuclear.

En España, el único dispositivo para el estudio de plasmas de fusión se encuentra en el Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT. Es una máquina de tipo stellarator con un campo magnético de un tesla y donde se alcanzan temperaturas de 25 millones de grados.



### **Potenciales temas de discusión**

- ¿Cuándo crees que estará disponible la energía de fusión para la producción de energía eléctrica?
- ¿Qué ventajas e inconvenientes tiene la fusión como fuente de energía comparada con otras?
- ¿Cómo funcionaría una planta de energía eléctrica basada en un reactor de fusión?
- ¿Qué otras reacciones de fusión se podrían emplear en un futuro?
- ¿Por qué hay dificultades para disminuir el tamaño de un reactor de fusión?
- ¿Hay otras fuentes de energía que se podrían utilizar para la colonización del espacio?

### **Bibliografía**

- <http://fusionsites.ciemat.es/divulgacion8/> Folletos divulgativos sobre energía y fusión nuclear
- <http://www-fusion.ciemat.es> Laboratorio Nacional de Fusión, CIEMAT



- [www.iter.org](http://www.iter.org) Proyecto ITER
- [www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org) Consorcio europeo para el desarrollo de la energía de fusión
- <http://phdcomics.com/comics.php?f=1716> What is Fusion?  
Simuladores de fusión (en inglés)
- [http://fusionsites.ciemat.es/?attachment\\_id=1992](http://fusionsites.ciemat.es/?attachment_id=1992) Póster  
"Fusión, la energía de las estrellas en la Tierra"
- <http://fusedweb.llnl.gov/cpep/Translations.html> Póster sobre  
plasmas y fusión del Contemporary Physics Education Project