



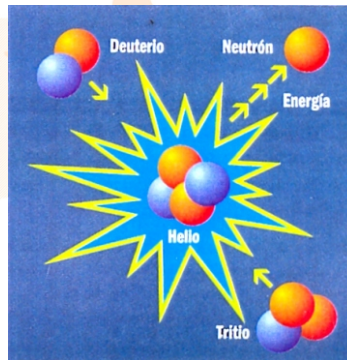
## Una mirada al proceso de fusión y al proyecto ITER

La fusión es el proceso que ocurre en el interior del sol. Núcleos de Hidrógeno (H) chocan entre sí y se funden produciendo átomos de Helio (He) y liberan cantidades inmensas de energía en el proceso. La temperatura alcanza a 15.000.000 °C. Los átomos de H están en constante movimiento colisionando a muy grandes velocidades superando la repulsión electrostática. En esta reacción la cantidad de energía liberada, equivalente a la disminución de masa de los productos finales con relación a los productos iniciales, responde a la ecuación de Einstein:  $E=mc^2$ . En cada segundo, nuestro sol convierte 600 millones de toneladas de H en He y libera energía.

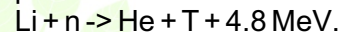
Ahora bien, sin la acción de las fuerzas gravitacionales del Universo, lograr la fusión en nuestro planeta ha requerido de distintas estrategias. Una de ellas es utilizar campos magnéticos como sistema de confinamiento del plasma.

El proceso está basado en la reacción de dos isótopos H: el Deuterio (D) y el Tritio (T). La reacción de fusión D-T produce una enorme cantidad de energía a temperaturas de 150.000.000 °C, diez veces mayor que en la reacción H-H que ocurre en el sol. A estas temperaturas, el combustible D-T cambia de estado, de gas a plasma, un estado de alta energía de materia donde los átomos son despojados de los electrones. La fusión entre D-T (fig.1) producirá un núcleo de He, un neutrón y un exceso de masa transformada en energía. El 80% de la energía producida en el plasma es transferida a los neutrones, que no tienen carga eléctrica y no son afectados por los campos magnéticos. Los neutrones serán absorbidos por el módulo de envoltura que recubre la cara interna de la cámara de vacío, cediendo sus energías como calor que será removido por los sistemas de refrigeración. En la planta prototipo y en las futuras instalaciones comerciales, el calor removido producirá vapor y, a través de turbinas y alternadores, electricidad.

La fusión contará con abundantes cantidades de combustible, ya que el D puede ser extraído del agua de mar, y el tritio se generará en el reactor de fusión a



partir de Litio (Li) depositado en la pared interna del módulo de envoltura ("blanket"), el cual interactúa con los neutrones producidos mediante la reacción:



De este modo, el T puede ser removido y reciclado en el plasma como combustible. Por otra parte el Li es muy abundante en la corteza terrestre. La generación de T durante el proceso de fusión es de importancia para una planta a gran escala. Existe en la naturaleza en pequeñas cantidades producidas por los rayos cósmicos, por lo que debe producirse artificialmente.

Los productos de fusión no son radiactivos, excepto el tritio que se recicla como combustible y no se liberan gases de efecto invernadero.

EL ITER (International Termonuclear Experimental Reactor) es una instalación de investigación que emplea como campo magnético la configuración Tokamak y además es la culminación de décadas de estudios (fig.2) en más de 20 máquinas

experimentales. En el año 2010 comenzó la construcción del edificio del ITER en Caradache, Francia, con la participación de la Unión Europea, China, Japón, India, Corea, Rusia y los Estados Unidos. El ITER está diseñado para demostrar la factibilidad científica y tecnológica de la producción de energía por fusión y tiene por objeto proveer el "know-how" para construir la primera estación de generación eléctrica.

$Q \geq 10$  simboliza la meta a alcanzar por el proyecto ITER: generar 10 veces más de

potencia que la que consume. De 50 MW de entrada, el ITER está diseñado para producir 500 MW de energía por fusión, siendo el primero de los experimentos para producir energía.

El sistema de campos magnéticos está integrado por:

- Bobinas superconductoras toroidales, construidas con Nb3Sn, para confinar y estabilizar al plasma.
- Bobinas superconductoras poloidales construidas con NbTi para fijar la posición y la forma del plasma.
- Un solenoide central modular construido con Nb3Sn, para inducir corriente en el plasma. Es la columna vertebral del sistema magnético.
- Bobinas correctoras, que permiten el ajuste fino del campo.

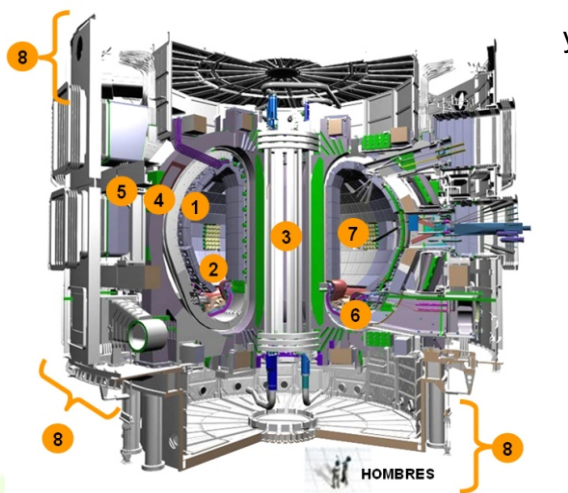
El peso del sistema magnético es de aproximadamente 8700 toneladas y la sección del toro es elíptica con una cierta triangularidad.

La cámara de vacío es un contenedor de doble pared de acero inoxidable herméticamente sellado que contará con 44 puertos y pesará algo más que la Torre Eiffel. El tamaño de la cámara de vacío es la que conforma el volumen del plasma de fusión. Las partículas de plasma se moverán en forma helicoidal sin tocar las paredes. La parte interna de la cámara de vacío está cubierta por el módulo de envoltura, el cual consiste de 440 segmentos de 1x1.5 metros cada uno. Cada segmento tiene una pared desmontable de Berilio que remueve el calor del plasma, y un blindaje de cobre de alta resistencia y acero inoxidable como blindaje a los neutrones.

El divertor ubicado en la base de la cámara de vacío, extrae los gases exhaustos residuales e impurezas. Consta de 54 cassettes extraíbles donde se ubican los blancos que interactúan con las partículas de plasma. El material del divertor debe poder soportar altas temperaturas durante su vida útil, se utilizará fibra de carbono reforzada. Un segundo divertor será de tungsteno.

Se instalará un sistema de diagnóstico para las mediciones necesarias para el control, la evaluación y la optimización del comportamiento del plasma.

Para completar el calentamiento ohmico se recurre al calentamiento externo a través de un haz neutro y dos fuentes de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Un sistema de distribución provee la electricidad necesaria para operar la planta



- |                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| 1 MÓDULO DE ENVOLTURA | 5 MAGNETOS POLOIDALES   |
| 2 CÁMARA DE VACÍO     | 6 DIVERTOR              |
| 3 SOLENOIDE           | 7 CALENTAMIENTO INICIAL |
| 4 MAGNETOS TOROIDALES | 8 CRIÓSTATO             |

los equipos de enfriamiento y el criogénico.

El criostato es una estructura cilíndrica que rodea la cámara de vacío para refrigerar los materiales superconductores y el divertor. La refrigeración se lleva a cabo con He a 4 °K (-269 °C).

Los combustibles usados en el ITER serán procesados en un ciclo cerrado. Al comienzo de la reacción de fusión, todo el aire e impurezas serán evacuados de la cámara de vacío. El sistema magnético que confinará y controlará el plasma es encendido y el combustible gaseoso se inyectará en la cámara de vacío. También se empleará un segundo dispositivo de alimentación por pellets congelados. Menos de un gramo de combustible fundido se encontrará presente en la cámara de vacío en todo momento. El divertor permite además, el reciclado del combustible no consumido que es bombeado fuera del divertor, separado del He producido en la reacción de fusión, mezclado con D y T frescos, y reinyectado en la cámara de vacío. En la próxima etapa, la futura planta de demostración, DEMO requerirá 300 g de combustible por día para producir 800 MW de potencia eléctrica.

Evidentemente todos estos estudios y experiencias permiten afirmar que en un futuro cercano, el proceso de fusión será la gran alternativa para cubrir las necesidades energéticas de la creciente humanidad.

(1) La Dra. Marta H. de Pahissa recibió Medalla de oro a la mejor Tesis (UBA, año1973) y el Premio a la Excelencia Profesional (Organización Mundial de las Naciones, año 1991)  
 ABREVIATURAS:  
 CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica / DOE: Department of Energy (EE.UU.) / ENRESA: Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (España) / KfK: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (Alemania) / OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica.



**Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable**  
**Comisión Nacional de Energía Atómica**

Tel: 011-4704-1485 www.cnea.gov.ar/ieds  
 Av. del Libertador 8250 - (C1429BNP) C. A. de Buenos Aires - República Argentina  
 Año de edición: 2011 ISBN: 978-987-1323-12-8