

# Plasma: Energía para el futuro...

Saúl Guadamuz Brenes (\*)  
sguadamuz@itcr.ac.cr

En un artículo precedente, abordamos la pregunta ¿qué es el plasma?, donde presentamos algunas de sus características más importantes, así como las aplicaciones más comunes en las que el cuarto estado de la materia afecta nuestra vida.

También explicamos cuál es el mecanismo que opera en las estrellas como nuestro Sol y por qué dicho mecanismo no puede ser reproducido en la Tierra debido a su tasa de reacción y sus requerimientos de presión y densidad de partículas.

Retomamos ahora una reacción nuclear que sí se podría dar en condiciones de laboratorio: la reacción deuterio-tritio.

## El criterio de Lawson

A mediados de los años cincuentas, el ingeniero y físico británico John D. Lawson determinó cuáles eran los factores críticos para obtener la “ignición” en un reactor de fusión nuclear, es decir, la condición en que la energía generada por la reacción es suficiente para mantener la temperatura del plasma sin ayuda externa. Dicho criterio era el producto de la densidad de electrones en el plasma y lo que él llamó “tiempo de confinamiento energético”[1].

En aquel entonces, se creía que la fusión nuclear podía tener aplicaciones militares, por lo que las investigaciones de Lawson eran información clasificada. Cuando se determinó que la fusión nuclear tendría su uso principal con fines pacíficos, la información fue revelada a la comunidad científica internacional y se mejoró el criterio ligeramente como el producto de tres cantidades: densidad del plasma,  $n_e$ , la temperatura,  $T_e$ , y el tiempo de confinamiento,  $\tau_e$ . Este “producto triple” es al que nos referimos actualmente cuando hablamos del criterio de Lawson [2].

¿Qué buscamos con dicho criterio? En la figura 1, observamos la comparación del producto triple de tres reacciones: deuterio-helio3(D-He3), deuterio-deuterio(D-D) y deuterio-tritio(D-T); se observa cómo el mí-

nimo producto triple requerido que se alcanza a menor temperatura (la cual debemos suplir de manera externa) es el de la reacción D-T. Ahora bien, aunque podríamos decir que la reacción D-T es la más fácil de lograr, la palabra “fácil” merece ser contextualizada, ya que necesitamos alcanzar una temperatura del orden de los 100 000 000 de grados Celsius<sup>1</sup>; esto es unas seis veces la temperatura del núcleo del Sol.

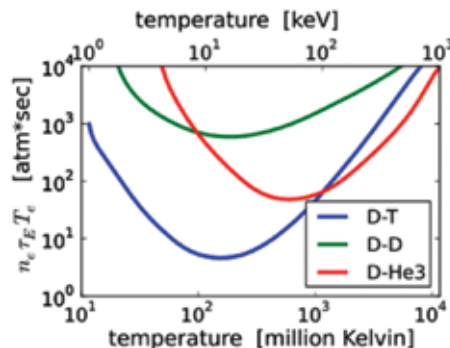


Figura 1. Producto triple para tres posibles reacciones nucleares. Imagen de Dstrozzi.

En este momento quizás el lector se pregunte: “¿Seis veces la temperatura del Sol? Pero si habíamos quedado en que las condiciones del Sol no se podían reproducir en la Tierra, ¿cómo se va a obtener una temperatura seis veces mayor?”

Es una pregunta totalmente justificada y la respuesta es la siguiente: las condiciones que no se pueden reproducir en la Tierra, son las de presión y densidad de partículas, dichas condiciones se “suavizan” al usar la reacción D-T, pero hay un precio que pagar, el cual es aumentar la temperatura. Afortunadamente, a diferencia de las condiciones de presión y densidad de partículas que son imposibles de lograr, la condición de temperatura solamente es muy difícil de lograr...

## Confinamiento del plasma

La siguiente pregunta lógica es cómo confinar el plasma: ¿dónde podría alguien comprar un recipiente en el cual introducir un gas a cien millones de grados Celsius? ¡En ningún lado! El plasma para fusión nuclear no puede ser confinado físicamente.

Pareciera una situación sin salida hasta que recordamos que una de las características del plasma expuestas en el artículo anterior, es que el gas está ionizado; estas son excelentes noticias ya que si el plasma es una gas ionizado entonces responde a campos magnéticos:

lo que necesitamos es un recipiente magnético.

Ahora debemos definir la forma del recipiente; la respuesta la encontramos en el trabajo del matemático francés Henri Poincaré, quien hace más de un siglo determinó que la única geometría que no permite puntos nulos en una superficie vectorial cerrada<sup>2</sup> es la toroidal [3]. De modo que nuestro recipiente magnético debe tener forma de toro (la figura geométrica, no el animal).

El problema técnico de cómo generar un campo magnético en forma de toro lo resolvieron, independientemente, científicos en la antigua Unión Soviética y en Estados Unidos. Los rusos propusieron combinar dos campos magnéticos más sencillos de manera que el campo magnético total fuera un toroide aproximadamente circular (ver figura 2) llamado “cámara toroidal con bobinas magnéticas” (*tokamak*, por sus siglas en ruso); mientras que los estadounidenses propusieron obtener el campo como resultado de una complicada geometría de bobinas de inducción (ver figura 3), aparato al que llamaron *stellarator* o “generador de estrellas”.

Como sucede muy frecuentemente, ambos acercamientos tienen sus pro y sus contra, y una comparación justa requeriría discusiones que van más allá del objetivo de este artículo; más bien, lo que haremos ahora es tomar uno de ellos para ilustrar aspectos de funcionamiento y seguridad.

## Fusión nuclear como fuente de energía

Volvamos por un momento a nuestra reacción favorita: queremos fusionar un átomo de

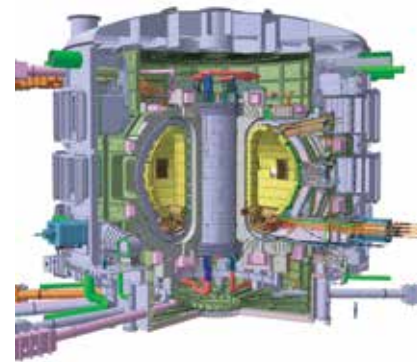


Figura 2. Tokamak ITER. Nótese el tamaño en comparación con una persona en la esquina inferior derecha. Imagen tomada de <http://www.fusion.kit.edu>.

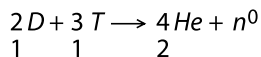
1 No es un error de impresión, necesitamos unos cien millones de grados Celsius.

2 Que es solo la manera elegante de decir que nuestro recipiente magnético no tendrá fugos de plasma.



Figura 3. Stellarator japonés LHD. Imagen de *National Institute for Fusion Science*.

deuterio con uno de tritio para producir un átomo de helio y un neutrón; esto se puede expresar como una fórmula:



Pero lo interesante es hacer un balance de masas entre el antes y el después de la reacción, utilizando la masa del protón ( $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$  kg) como referencia:

$$1,999006m_p + 2,993716m_p \rightarrow 3,972596m_p + 1,001378m_p$$

Se observa que existe un déficit de  $0,01875m_p$  que traducido en energía, utilizando la famosa ecuación de Einstein, da como resultado:

$$E = mc^2 = (0,01875m_p)c^2 = 2,818 \times 10^{-12} J = 17,59 MeV$$

Ahora bien, probablemente algunos de los lectores no estén familiarizados con las unidades de energía de la ecuación anterior, por lo que es útil poner esos números en perspectiva de la siguiente forma: la energía que podemos obtener de 33 mg de deuterio y 50 mg de tritio es equivalente a la que se obtiene de 360 litros de petróleo [4].

Una vez obtenida la reacción de fusión, la energía liberada se capta en las paredes del dispositivo de confinamiento –digamos el *tokamak*– en forma de calor, el cual se utiliza para producir electricidad por medio de generadores como normalmente se haría en cualquier otro proceso de producción térmica de energía, como una fuente geotérmica. La figura 4 ilustra, de manera simplificada, el proceso recién descrito.

Sin embargo, antes de poder explotar las ventajas energéticas de la fusión nuclear, hay que superar varios obstáculos de implementación técnica muy interesantes desde el punto de vista de la ingeniería.

### Primer reto: confinamiento magnético

Como ya dijimos, en un *tokamak* se deben



Figura 4. Esquema simplificado de la producción de electricidad mediante un *tokamak*. Imagen de JET EFDA.

generar, no uno, sino dos campos magnéticos que se combinarán para confinar el plasma; estos campos son:

- **Campo poloidal:** se aprovecha la alta conductividad eléctrica del plasma para inducir una corriente en él utilizando el principio de un transformador; la llamada bobina interna de campo poloidal (“inner poloidal field coil”, en la figura 5) funciona como promeario y produce la corriente eléctrica del plasma (“plasma electric current”, en la figura 5) que sería el secundario; esta corriente, a su vez, induce el campo magnético poloidal (“poloidal magnetic field” en la figura 5).
- **Campo toroidal:** una serie de bobinas de inducción que “abrazan” al plasma (“toroidal coils”, en la figura 5) inducen el campo magnético toroidal (“toroidal magnetic field”, en la figura 5).

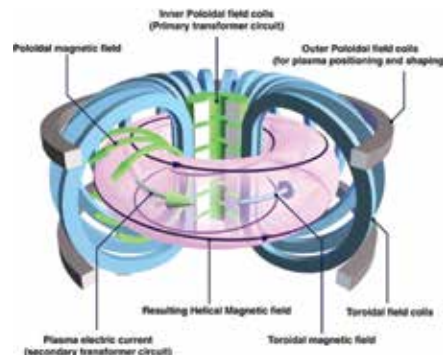


Figura 5. Ilustración de cómo los campos poloidal y toroidal se combinan para confinar el plasma en un *tokamak*. Imagen de JET EFDA.

Podemos observar cómo el campo magnético total tiene forma de hélice y sigue la geometría toroidal del plasma (“resulting helical magnetic field”, en la figura 5).

La intensidad del campo magnético en un *tokamak* es muy alta; por ejemplo, en el Massachusetts Institute of Technology opera el *tokamak* ALCATOR C-MOD, en el que se establecen campos magnéticos unas 100 000 veces el campo de la Tierra [5]. En

consecuencia, la corriente que circula por las bobinas de inducción es muy alta y estas deben ser enfriadas a temperaturas criogénicas (menores a los 100 grados bajo cero) para que funcionen adecuadamente.

El hecho de tener dos extremos de temperatura (el plasma muy caliente y las bobinas de inducción muy frías) en un mismo aparato es todo un reto para ingenieros en materiales, eléctricos, electrónicos, mecánicos, etc.

### Segundo reto: calentamiento

Después de confinar el plasma es necesario calentarlo hasta alcanzar la ignición, pero el escenario no es el mejor, tal como se aprecia en la figura 6. Conforme se va incrementando la temperatura del plasma por medio del calentamiento óhmico (producto de la corriente de plasma en figura 5), la eficiencia de este calentamiento decae hasta alcanzar un punto en que las pérdidas de calor superan la entrada de calor.

Se hace necesario entonces implementar sistemas auxiliares de calentamiento hasta que el plasma alcance la ignición. Estos sistemas auxiliares de calentamiento hacen uso de:

- **Ondas electromagnéticas:** en donde microondas a frecuencias específicas aumen-

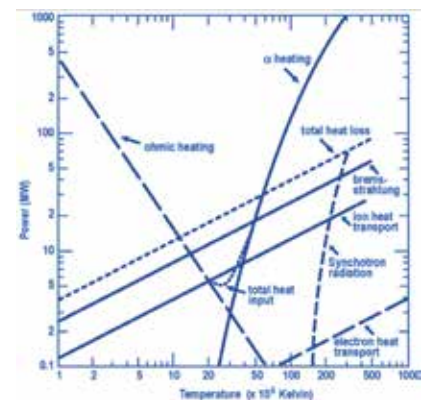


Figura 6. Balance de potencia al calentar el plasma: el punto señalado como “total heat input” es menor a la línea “total heat loss”, lo que hace necesario emplear sistemas de calentamiento auxiliares. Imagen de D. R. Sweetman, Nucl. Fus. 13 (1973) 157-165.

tan la energía cinética de las partículas en el plasma; para hacerlo se utilizan arreglos de antenas y guías de onda.

- **Rayos de partículas neutras:** en donde el aumento en la energía se logra por medio de colisiones entre el plasma y las partículas neutras inyectadas.

Vale la pena mencionar que aún no se ha podido llegar al punto conocido como “break-even”, en donde la energía invertida es igual a la obtenida del plasma; se espera que el proyecto ITER alcance e incluso supere dicho punto [6].

### Seguridad en la fusión nuclear

Una de las mayores preocupaciones cuando se habla de implementar un reactor de fusión nuclear es la seguridad; esto en vista de la inevitable asociación que se hace de la palabra “nuclear” con la palabra “bomba” y la expresión “desechos radioactivos”.

Entonces, ¿representa un reactor de fusión nuclear, peligro en forma de una eventual y violenta reacción en cadena? La respuesta es no, lo cual pudiera parecer contradictorio a la luz de eventos como los de Three Mile Island en Pensilvania, Estados Unidos, 1979; Chernóbil en Ucrania, antigua Unión Soviética, 1986; y más recientemente en Fukushima, Japón, 2011.

Lo primero que debemos dejar claro, es que accidentes como los mencionados anteriormente fueron todos en plantas de *fisión nuclear* y no de *fusión nuclear*<sup>3</sup> que es el tema de este artículo; por otra parte, lo que ocurrió en tan lamentables eventos no fue una reacción en cadena como la que se da en una bomba, ya que el combustible de uranio para una bomba atómica está mucho más enriquecido (es decir, tiene una cantidad de isótopos de uranio específicos artificialmente aumentada) que el utilizado en plantas para producción de energía eléctrica.

En los tres accidentes señalados se produjo un evento llamado comúnmente “nuclear meltdown” (usualmente traducido al español como “fusión de núcleo”). Esto ocurre cuando el sistema de enfriamiento del reactor falla y las barras de combustible nuclear (uranio) se calientan hasta el punto de derretirse total o parcialmente; si el sistema no se enfría, el calor puede derretir incluso el confinamiento de

acero alrededor de las barras de uranio, llamado núcleo. En un caso extremo, las barras de uranio derretido podrían hundirse en la tierra debajo de la planta hasta unos 15 metros y, si llegara a tocar mantos acuíferos, produciría explosiones de vapor radioactivo y escombros [7].

Por otra parte, la fusión nuclear es intrínsecamente segura, ya que las condiciones para que esta suceda son muy difíciles alcanzar, como ya se ha mencionado en este artículo. De hecho, si un accidente llegara a ocurrir en un reactor de fusión nuclear, lo peor que podría pasar sería que la reacción se detuviera, eliminando automáticamente los riesgos de una “fusión descontrolada”.

Tenemos que considerar también las diferencias a nivel de desechos radioactivos; en el caso de la fisión, estos son abundantes y duraderos, no solo debido a la reacción en sí misma, sino a que el agua o cualquier otro agente de enfriamiento queda también contaminado. En cambio con la fusión, los desechos radioactivos son mínimos y su “vida” es menor a una generación; es más, si se escogen bien los elementos a fusionar y el proceso para lograrlo, los productos secundarios peligrosos para el medio ambiente son comparables a los de cualquier otro proceso de producción de energía y ni siquiera se clasifican como “basura radioactiva” [8]. De hecho, en el diseño de reactores de fusión nuclear se tiene más cuidado con los riesgos debidos a los sistemas secundarios que a los del reactor mismo.

Evidentemente, la comparación entre fisión y la fusión no es del todo justa, ya que la primera es una tecnología madura, de la cual se conocen los riesgos gracias a la experiencia; mientras en el caso de la segunda, no solo la tecnología, sino que incluso la teoría, está en desarrollo por lo que no podemos excluir a ciencia cierta problemas de implementación y manejo.

En conclusión, la fusión nuclear ofrece la posibilidad de brindar energía de forma abundante, segura y amigable con el ambiente; por supuesto, no es una tecnología perfecta, pero de hecho ninguna lo es, por lo que debemos concentrarnos en plantear la mejor estrategia de producción de energía posible ya que lo que sí es cierto, es que nuestro planeta no soportará el ritmo de consumo energético que le exigimos de forma indefinida. No importa si participamos en la investigación en fusión nuclear,

si desarrollamos mejores paneles solares, si explotamos la biomasa o si simplemente apagamos la luz cuando no la estamos utilizando: todos podemos colaborar en disminuir nuestra huella ecológica y garantizar energía para las futuras generaciones.

El lector interesado puede enterarse de cómo el Instituto Tecnológico de Costa Rica se involucra activamente en este proceso ingresando en los sitios web:

<http://www.plasma.ietec.org>

<http://www.seslab.ietec.org>

[http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDoQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.renenergyobservatory.org%2Falfresco%2Fd%2Fa%2Fworkspace%2FSpacesStore%2F1d9ae9e2-8d07-4cd2-ae1a-e95179702c62%2Fpeltec.pdf%3Fguest%3Dtrue&ei=\\_q5cUquXJ9SPkAeH2YDIDg&usq=AFQjCNGQSUVrDtUAlWXYp9uK2kEdkocLg&sig2=kO7bg\\_s6xrqbc4cxnm\\_fUw&cbvm=bv.53899372,d.eW0](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDoQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.renenergyobservatory.org%2Falfresco%2Fd%2Fa%2Fworkspace%2FSpacesStore%2F1d9ae9e2-8d07-4cd2-ae1a-e95179702c62%2Fpeltec.pdf%3Fguest%3Dtrue&ei=_q5cUquXJ9SPkAeH2YDIDg&usq=AFQjCNGQSUVrDtUAlWXYp9uK2kEdkocLg&sig2=kO7bg_s6xrqbc4cxnm_fUw&cbvm=bv.53899372,d.eW0)

### Referencias

- [1] J. D. Lawson. “Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor”. Proceedings of the Physical Society B, Volume 70 (1957), p. 6
- [2] Wesson, John. “Tokamaks”. 3 Ed, Oxford University Press, New York. 2004.
- [3] Kikuchi, Mitsuru. “Frontiers in Fusion Research”. Springer, 2011.
- [4] FOM-Rijnhuizen/Verdult - Kennis in Beeld. “Fusion Energy. Cleaner Energy for the Future”. EFDA, 2005.
- [5] The Alcator C-Mod Tokamak. En: <http://www.fusionfuture.org>, accesado 16-10-2013.
- [6] FAQs. En: <https://www.efda.org>, accesado 16-10-2013.
- [7] Nuclear Disasters and Accidents. En: <http://library.thinkquest.org>, accesado 09-10-2013.
- [8] Nuclear Fusion, JET and ITER: Your Questions Answered. En <http://www.theengineer.co.uk> accesado 09-10-2013. ■

(\*) Saúl Guadamuz Brenes es profesor e investigador de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Es ingeniero en electrónica graduado en el TEC y tiene una maestría y un doctorado en ingeniería electrónica y comunicaciones, ambos del Politecnico di Torino, Italia.

<sup>3</sup> De hecho, el proceso de fisión es contrario al de fusión: elementos pesados (como el uranio) se dividen en elementos más livianos.