

## Programa de actividades en fusión nuclear controlada

FARENGO R., GERVASONI J., MAYER R. E. Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica

**La fusión nuclear controlada puede constituirse en una de las alternativas más interesantes para la generación de energía eléctrica en gran escala. Nuestro país ha alcanzado logros muy significativos en la utilización de la fisión nuclear para la generación de energía eléctrica y no debe quedar al margen del desarrollo de la fusión nuclear, que posee varias ventajas comparativas. La CNEA, como Institución encargada de la actividad nuclear en el país, debe contar con un programa integral de actividades en fusión nuclear controlada.**

*The controlled nuclear fusion could be transformed in one of the more interesting alternatives for electricity generation on a great scale. Argentina has major achievements in the utilization of nuclear fission in electricity generation, and ought not to be out in the development of nuclear fusion, which has several comparatives advantages. CNEA, as the institution responsible for nuclear activity in the country, must have a controlled nuclear fusion integral programme.*

### 1. Introducción

La **fusión nuclear controlada** puede constituirse en una de las alternativas más interesantes para la generación de energía eléctrica en gran escala. Esto se debe a su seguridad, al reducido impacto ambiental y a la existencia de cantidades casi ilimitadas de combustible.

El progreso alcanzado a nivel internacional en ambos métodos de confinamiento, confinamiento magnético y confinamiento inercial, es significativo. En el área de confinamiento magnético se está desarrollando el proyecto multinacional ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) que incluye la construcción y operación de un dispositivo experimental que produzca aproximadamente 500 MW de potencia de fusión e incorpore la mayor parte de los desarrollos tecnológicos necesarios para la construcción de un reactor comercial. En el área de confinamiento inercial, los últimos resultados obtenidos en el proyecto NIF (*National Ignition Facility*) han sido alentadores y hay importantes proyectos en marcha en Francia y China.

Nuestro país ha alcanzado logros muy significativos en la utilización de la **fusión nuclear** para la generación de energía eléctrica y no debe quedar al margen del desarrollo de la **fusión nuclear**, que posee varias ventajas comparativas. La CNEA, como Institución encargada de la actividad nuclear en el país, debe contar con un programa integral de actividades en fusión nuclear controlada. La Ley Nacional de la Actividad Nuclear (Ley N° 24.084) actualmente en vigencia indica explícitamente la responsabilidad de la CNEA en el tema (art. 2, inc. m).

Debido a su complejidad, el diseño, construcción y operación de un reactor de fusión para la producción de electricidad, con potencia semejante a la de los reactores de fisión, requiere desarrollos científicos y tecnológicos en muchas áreas. Estas incluyen, entre otras, física de plasmas, materiales, física atómica y molecular, neutrones, producción de tritio, control, seguridad y licenciamiento. La CNEA posee recursos humanos capacitados y experiencia en muchos de estos temas, provenientes fundamentalmente de las actividades en fisión nuclear. Lo que se propone es iniciar un programa integral de actividades en fusión nuclear controlada, que complemente las actividades en fisión nuclear y aproveche las capacidades desarrolladas por la CNEA en esta área. Este programa debería posicionar a la CNEA como referente nacional e internacional en el tema por la calidad de sus investigaciones científicas y el desarrollo de soluciones innovativas.

### 2. Estado de las investigaciones en fusión nuclear controlada

Para que se produzcan reacciones de fusión es necesario que los núcleos se acerquen lo suficiente como para que la fuerza nuclear (atractiva) sea mayor que la repulsión Coulombiana. Debido a esto, la sección eficaz de la reacción de fusión de deuterio (D) con tritio (T), la más fácil de producir, sólo es significativa a energías mayores a algunos keV. Resulta evidente que a estas energías las colisiones producen la ionización de los átomos de D y T de modo que las reacciones de fusión ocurren en un gas ionizado a alta temperatura (plasma) compuesto por iones D y T, electrones e impurezas.

El plasma pierde energía por conducción, convección y radiación y es necesario reponerla

para mantener su temperatura. Se define entonces el tiempo de confinamiento de la energía ( $\tau_E$ ) como el cociente entre el contenido de energía del plasma ( $W_p$ ) y la potencia ( $P_H$ ) que hay que entregarle para mantener su temperatura ( $\tau_E = W_p / P_H$ ). En la situación ideal, conocida como ignición, esta potencia es depositada por las partículas alfa producidas en las reacciones de fusión. Un análisis del balance de potencia de un reactor de fusión muestra que el parámetro conocido como *triple producto de fusión*,  $nT\tau_E$ , donde  $n$  es la densidad del plasma (en partículas por unidad de volumen) y  $T$  su temperatura (se redefine la temperatura de modo de incluir la constante de Boltzman  $\tau k_B T$ ), debe llegar a valores del orden de  $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$  para alcanzar la ignición. Considerando que el valor de temperatura no puede apartarse mucho de los 10-20 keV se han propuesto dos métodos para alcanzar los valores necesarios del triple producto de fusión.

En el método conocido como *confinamiento magnético* se utilizan campos magnéticos para confinar el plasma y mantenerlo alejado de las paredes de la cámara de reacción. Como la densidad está limitada a valores del orden de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ , se necesitan valores de  $\tau_E$  del orden de algunos segundos. Es decir, en confinamiento magnético se tienen  $n$  y  $T$  aproximadamente fijos por lo que se debe tratar de aumentar el valor de  $\tau_E$ . En el método conocido como confinamiento inercial se irradia una pequeña pastilla de combustible con pulsos de láseres

o haces de partículas para comprimirla y calentarla. La potencia depositada sobre la pastilla debe ser suficientemente grande como para que en el centro de la misma se alcancen las condiciones necesarias para que se produzcan reacciones de fusión. Como el combustible no se encuentra realmente confinado, sino que se expande a una velocidad limitada solo por su propia inercia cuando finaliza el pulso, el tiempo de confinamiento está limitado y se debe tratar de incrementar la densidad final del combustible.

En los últimos años se han realizado importantes avances en ambas líneas de confinamiento. En confinamiento magnético se ha encontrado cómo reducir el efecto de la turbulencia sobre el transporte y se ha aprendido a controlar algunas de las inestabilidades más peligrosas. Por otro lado, la gran cantidad de información obtenida en los experimentos realizados en dispositivos de diferente tamaño y condiciones de operación, ha permitido formular leyes de escala relativamente confiables para predecir el comportamiento del plasma en dispositivos de mayor tamaño. Esto ha llevado al diseño y construcción (en curso) de un "tokamak" de gran tamaño conocido como ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). ITER se construye en Cadarache (Francia) y se prevé que produzca 500 MW de potencia de fusión.

La figura 1 muestra una maqueta de ITER y la tabla I algunos de sus parámetros.

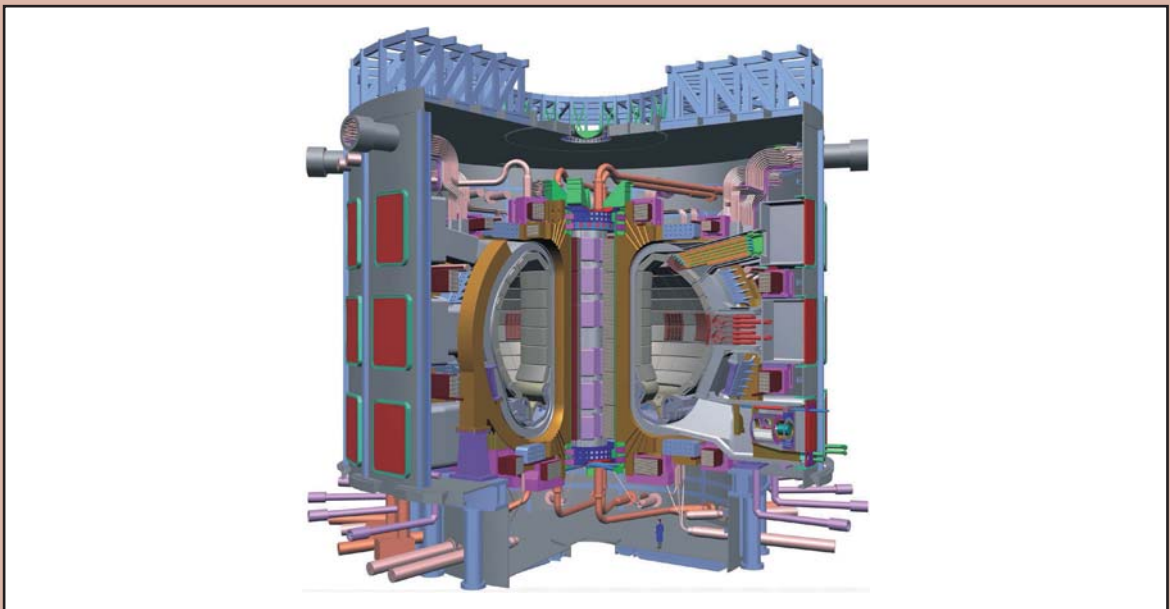


Figura 1. Maqueta del ITER

R (radio mayor)	6.2 m
a (radio menor)	2.0 m
$\frac{R}{a}$ (elongación)	1.7
I (corriente)	15 MA
B0 (campo magnético.)	5.3 T
Flujo neutrónico	0.57 MW/m <sup>2</sup>
P <sub>fus</sub>	500 W
Q	≥10
Pulso	> 400 s
Volumen	837 m <sup>3</sup>
Superficie	678 m <sup>2</sup>

**Tabla 1.** Principales parámetros del ITER

En confinamiento inercial los mejores resultados han sido alcanzados en el proyecto NIF (National Ignition Facility) que se encuentra en Livermore (EEUU). En este experimento se utiliza un láser de 500 TW de potencia (el mayor del mundo) para irradiar una pastilla de combustible. Para lograr una mayor uniformidad en la irradiación, el láser se divide en 192 haces que deben converger con

absoluta precisión sobre el blanco. En experimentos recientes se consiguió que la energía liberada por las reacciones de fusión excediera la energía absorbida por el combustible. Esto constituye un logro muy importante pero no significa alcanzar la ignición, porque la energía entregada por el láser es mucho mayor que la depositada en el combustible. La figura 2 muestra NIF y la tabla II sus principales parámetros.



**Figura 2.** Vista del láser utilizado en NIF



Medio	Nd
Energía	2.0 MJ
Potencia	500 TW
Longitud de onda	1.05-0.35 $\mu$ m
Pulso	23 ns
Haces	192

**Tabla 2.** Principales parámetros de NIF

### 3. Objetivos del programa

Los objetivos fundamentales del programa propuesto son:

1. Formar recursos humanos en los temas de interés para el desarrollo de la fusión nuclear controlada.
2. Realizar actividades coordinadas de investigación y desarrollo en la mayoría de las áreas relevantes para el desarrollo de reactores de fusión nuclear. Aprovechar la experiencia adquirida en el desarrollo de la fisión nuclear.
3. Participar en proyectos internacionales.
4. Transferir/aplicar los conocimientos desarrollados hacia otras áreas nucleares y no nucleares.

### 4. Áreas relevantes en las que la CNEA debería (puede) realizar actividades.

Uno de los aspectos fundamentales del programa propuesto es el aprovechamiento de la experiencia y conocimientos de muchos grupos de la CNEA en temas afines, provenientes de sus actividades en fisión.

#### Física de Plasmas

La física de plasmas es la ciencia básica para el desarrollo de la fusión nuclear controlada. Históricamente, las actividades en fusión nuclear controlada comenzaron con estudios sobre el comportamiento de los plasmas en las condiciones en que se encuentran en el interior de un reactor de fusión y fueron incorporando otras áreas cuando el crecimiento de los dispositivos experimentales lo hizo necesario. Esto es así porque las características de un reactor de fusión quedan determinadas por las condiciones que deben satisfacerse en la cámara de reacción, donde se encuentra el combustible en estado de plasma. Estas condiciones son muy exigentes porque es necesario mantener el combustible a temperaturas superiores a los 100 millones de °C (10 keV) y alejado de toda pared

material. Por otro lado, las condiciones existentes en el plasma definen los flujos de energía, partículas y radiación electromagnética a que se ven sometidas las distintas componentes del reactor, y los métodos necesarios para transformar la energía liberada en las reacciones de fusión en electricidad.

#### Materiales

Un reactor de fusión requerirá una enorme cantidad de materiales diferentes, entre los que pueden mencionarse: materiales en contacto directo con el plasma, estructurales, superconductores, moderadores, reproductores, refrigerantes, blindaje, etc. Un problema importante para el desarrollo de materiales apropiados es la falta de instalaciones donde puedan probarse en las mismas condiciones a que se verán sometidos en un reactor de potencia.

La CNEA tiene una vasta e importante actividad en materiales, contando con varios grupos de investigación y desarrollo ampliamente reconocidos, tanto a nivel nacional como internacional. Se indican a continuación algunas áreas específicas en las que se requieren nuevos desarrollos.

#### **Materiales en contacto directo con el plasma:**

Estos materiales estarán sometidos al bombardeo de los iones que escapan al confinamiento y de los neutrones producidos en las reacciones de fusión. Deben tener baja adsorción de deuterio y tritio, bajo número atómico y ser resistentes al "sputtering". Para recubrir la cara interna de ITER se ha seleccionado el berilio y para las placas de divertores, que estarán sometidas a un alto flujo de energía, el tungsteno.

**Materiales estructurales:** En ITER se utilizarán fundamentalmente aceros pero también se trabaja activamente en la utilización de materiales compuestos. Se trata de producir aleaciones resistentes al daño por neutrones y que decaigan rápidamente una vez cerrado el reactor. Los aceros con alto contenido de boro han recibido mucha atención por su interés, tanto para reactores de fusión como para reactores avanzados de fisión (cuarta generación).

**Moderadores:** Los neutrones se llevan el 80% de la energía producida en la reacción D-T por lo que es necesario utilizar un moderador que extraiga esta energía para utilizarla en un ciclo térmico. Como además es necesario producir tritio dentro del reactor a partir de la reacción de los neutrones con litio, se ha pensado en combinar ambas funciones en un único material.

**Superconductores:** Las espiras que producen los campos magnéticos necesarios para confinar el plasma deben ser superconductoras para evitar que la energía perdida por disipación Ohmica afecte el balance energético del reactor. Lamentablemente, no existen por el momento materiales superconductores de alta temperatura crítica capaces de soportar los intensos campos magnéticos necesarios.

### Física atómica y molecular

Las impurezas desprendidas de las paredes pueden penetrar en el plasma, produciendo la dilución del combustible y la pérdida de potencia por emisión de radiación. Por otro lado, uno de los métodos más eficientes para calentar el plasma consiste en la inyección de haces neutros de D o T, que deben ionizarse debido a colisiones con los iones y electrones del plasma para quedar confinados por el campo magnético. Finalmente, varias técnicas de diagnóstico se basan en la detección de la radiación emitida en la interacción entre los iones del plasma y átomos neutros de D o T e impurezas. Resulta pues fundamental estudiar los procesos de interacción de los iones D y T con D y T neutros e impurezas. La CNEA cuenta con profesionales de amplia experiencia en estos temas y también con aceleradores capaces de producir haces de iones con las energías necesarias.

### Neutrones

En la fusión de un núcleo de deuterio con uno de tritio se produce un neutrón de 14 MeV. Estos neutrones deben ser frenados para extraer su energía y aprovechados para producir tritio dentro del reactor, a partir de litio. Por otro lado, las mediciones de distribución temporal y espacial del flujo de neutrones proporcionan información sobre las condiciones en el plasma.

### Tritio

Como se indica más arriba, el tritio debe ser producido dentro del reactor a partir de litio. La producción, extracción y re-inyección (como

combustible) del tritio representa un serio problema, que debe ser resuelto satisfactoriamente para garantizar la seguridad del reactor. Esto incluye el desarrollo de materiales con litio que puedan utilizarse en el “blanket” moderador y reproductor y el estudio de la difusión del tritio en dichos materiales.

### Reactores híbridos fusión-fisión

Estos reactores utilizarían los neutrones producidos en las reacciones de fusión para fisurar material fértil, subcrítico, que lo rodea. La complementación entre la fusión y la fisión es evidente y resultaría en reactores inherentemente seguros porque en caso de accidente las reacciones de fusión se detienen y con eso también las de fisión. Como ventaja adicional, los requerimientos para la generación de neutrones de fusión son mucho menores que para un reactor “puro” de fusión.

### Termohidráulica

La energía depositada por los neutrones en el moderador debe ser extraída para su aprovechamiento. El grupo de termohidráulica de la CNEA posee amplia experiencia en las áreas de Mecánica de Fluidos y Transferencia de Energía y Masa, mayoritariamente aplicadas a remoción de calor en reactores de fisión, y realiza estudios experimentales sobre problemas de circulación forzada, cavitación, convección natural, ebullición y fuerza boyante.

### Control

El control del estado del plasma resulta crítico en un reactor de fusión. Las inestabilidades, que pueden acabar con el confinamiento y producir serios daños al reactor, se desarrollan en tiempos muy cortos por los que se requieren mecanismos de control que actúen con gran rapidez y resistan un ambiente muy hostil.

### Seguridad y licenciamiento

Un reactor de fusión constituye una instalación nuclear y como tal debe satisfacer estrictas normas de seguridad. La construcción de ITER requirió del desarrollo de protocolos específicos pero aún queda mucho por hacer en este tema.

## 5. Acciones necesarias para cumplir los objetivos propuestos

Se presentan a continuación las acciones que se considera necesario realizar para alcanzar los objetivos propuestos.

### A - Formar recursos humanos

Resulta claro que ninguna actividad de investigación y desarrollo puede llevarse a cabo si no se cuenta con recursos humanos capacitados en los distintos temas de interés. La CNEA cuenta con varios Institutos de excelente nivel académico donde se forman profesionales que podrían participar en el programa. Desde hace más de 15 años se dictan cursos de post grado sobre fusión nuclear y física de plasmas en el Instituto Balseiro y se ofrecen trabajos de maestría y doctorado en estos temas. Para asegurar una adecuada provisión de profesionales jóvenes interesados en el tema, estas actividades deben ampliarse, incluyendo otras áreas de interés y otros Institutos. Por otro lado, debe estimularse y facilitarse la formación/especialización de aquellos agentes que, poseyendo amplia experiencia en temas relacionados en el área de fusión nuclear, quieran orientar parte de sus actividades hacia temas de fusión nuclear.

### B - Realizar investigación y desarrollo en fusión nuclear controlada

La ejecución de un programa coordinado de investigación y desarrollo en las áreas consideradas más relevantes y accesibles requiere de varias acciones complementarias:

#### *i - Ampliación y consolidación del área específicamente dedicada a fusión nuclear y física de plasmas*

El Grupo de Fusión Nuclear y Física de Plasmas de la Gerencia de Física del Centro Atómico Bariloche trabaja desde hace muchos años en temas de física de plasmas aplicada a reactores de fusión y posee una visión global de las necesidades y dificultades asociadas al desarrollo de los reactores de fusión. Este grupo debe ser ampliado, equipado y dotado de suficiente espacio para que pueda incorporar nuevas líneas de trabajo y asesorar a otros grupos que quieran sumarse al programa.

#### *ii - Aplicación de los conocimientos y experiencia adquiridos en el desarrollo de la fisión nuclear a la fusión nuclear*

Las áreas consideradas relevantes y accesibles fueron presentadas más arriba. Se debe fomentar el interés de los grupos que se encuentran capacitados para participar en el programa y asegurar un adecuado financiamiento para la realización de actividades en fusión nuclear. También es importante fomentar la comunicación entre grupos dedicados a distintos temas de modo que todos tengan una visión global de las características de un reactor de fusión y los problemas asociados a su desarrollo.

### C - Conformar el Comité Coordinador del Programa de Fusión Nuclear Controlada

Para avanzar en un programa integral de actividades como el propuesto es necesaria la participación coordinada de muchos sectores de la CNEA. Para estimular dicha participación se propone establecer un esquema de subsidios internos que financie los gastos asociados a las nuevas actividades.

Desde el punto de vista organizativo, se ha conformado el Comité Coordinador del Programa de Fusión Nuclear Controlada. Este comité está formado por un representante de cada Gerencia de Área y su misión es evaluar los proyectos presentados por los sectores interesados, aprobar la asignación de fondos específicos y vigilar la marcha general del programa.

### D - Establecer convenios de cooperación internacional

Debido a la complejidad y costo de las investigaciones sobre fusión nuclear controlada la cooperación internacional resulta imprescindible. El más claro ejemplo de esto lo constituye el proyecto ITER, en el que participan la Comunidad Europea, Japón, Rusia, EEUU, China, Corea e India. Los acuerdos de cooperación pueden involucrar temas puntuales o programas completos. Se considera deseable la concreción de acuerdos de cooperación a nivel regional, fundamentalmente con Brasil, y con países que participen en el proyecto ITER. La participación directa en ITER no parece ser una opción razonable/posible por el momento. Solo sería posible si se plantea a nivel regional y media una decisión política y apoyo al más alto nivel del Poder Ejecutivo Nacional.

**E - Implementar una adecuada difusión de las actividades de la CNEA en fusión nuclear controlada.**

Para fomentar la participación de los distintos sectores y de los egresados de los Institutos de la CNEA es necesario dar amplia difusión interna a las actividades en fusión nuclear controlada. También es importante que otras Instituciones del país y el público en general sean informados de las actividades de la CNEA en el tema, sus alcances y expectativas.

Finalmente, es necesario que los investigadores participantes en el programa puedan presentar sus resultados en reuniones científicas internacionales y organismos técnicos.

Trabajo presentado en la XXXX Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Buenos Aires, 2 al 6 de diciembre de 2013