



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i1.2597>

Ciencias técnicas y aplicadas  
Artículo de revisión

*Fusión nuclear: Estado del arte y futuras tendencias*

*Nuclear fusion: State of the art and future trends*

*Fusão nuclear: estado da arte e tendências futuras*

José Luis Sampietro-Saquicela <sup>I</sup>  
[jose.sampietr@celec.gob.ec](mailto:jose.sampietr@celec.gob.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0610-089X>

Carlos Iván Villacis-Moya <sup>II</sup>  
[carlos.villacis@celec.gob.ec](mailto:carlos.villacis@celec.gob.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-9090-8263>

Jennifer Katherine Arboleda-Elizalde <sup>III</sup>  
[jennifer.arboleda@utelvt.edu.ec](mailto:jennifer.arboleda@utelvt.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-7615-3167>

David Leonardo Rodríguez-Portes <sup>IV</sup>  
[david.pucese@gmail.com](mailto:david.pucese@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1574-4382>

Luis Adrián González-Quiñonez <sup>V</sup>  
[luis.gonzalez@utelvt.edu.ec](mailto:luis.gonzalez@utelvt.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-5026-0028>

Luis David Espinoza-Motoche <sup>VI</sup>  
[luis.espinoza.motoche@utelvt.edu.ec](mailto:luis.espinoza.motoche@utelvt.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-4788-569X>

Jaime Rafael Bastidas-Heredia <sup>VII</sup>  
[jaime.rafael.bastidas@upc.edu](mailto:jaime.rafael.bastidas@upc.edu)  
<https://orcid.org/0000-0003-3022-5756>

Joseph Eli Izquierdo-Obando <sup>VIII</sup>  
[joseph.izquierdo@pucese.edu.ec](mailto:joseph.izquierdo@pucese.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0610-089X>

Byron Fernando Chere-Quiñónez <sup>IX</sup>  
[bchere8077@utm.edu.ec](mailto:bchere8077@utm.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-1886-6147>

**Correspondencia:** [jose.sampietr@celec.gob.ec](mailto:jose.sampietr@celec.gob.ec)

**\*Recibido:** 10 de enero de 2022 **\*Aceptado:** 20 de enero de 2022 **\* Publicado:** 21 de febrero de 2022

- I. PhD en Automática y Robótica y Visión, Especialista de Ingeniería en CELEC EP TERMOESMERALDAS I.
- II. Magister en Gestión de Proyectos, Ingeniero Electrónico en Automatización y Control, Jefe de operación Central Santa Rosa CELEC EP TERMOPICHINCHA.
- III. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingenierías (FACI) en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE).
- IV. Doctorando en Proyectos UBJ México Magister en educación UTEQ Ecuador, Master en Psicodidáctica Universidad País Vasco, Ingeniero de Sistemas PUCSE, Director de TICS GADMCE Director del Proyecto de Ciudad Inteligente Esmeraldas, Ecuador.
- V. Máster Universitario en Sistemas Integrados de Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales la Calidad el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social Corporativa, Ingeniero de Mantenimiento. Docente Investigador de la Facultad de Ingenierías (FACI) en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTELVT), Ecuador.
- VI. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingenierías (FACI) en la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE), Ecuador.
- VII. MBA por la Escuela Politécnica Nacional (quito) y MSc en Energías Renovables y sostenibilidad Energética por la Universitat de Barcelona, España.
- VIII. Magister en Tecnologías de la Información, Ingeniero en Sistemas Informáticos, Perito Informático Calificado, Función Judicial registro 938205, Analista de Archivo General del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Esmeraldas, Ecuador.
- IX. Ingeniero Eléctrico, Instituto de Posgrado, Maestría de Investigación en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

## Resumen

Los rápidos avances de la energía nuclear han enfrentado cambios significativos durante los últimos años, desde su descubrimiento y utilización para fines bélicos a finales de la segunda guerra mundial como lo ocurrido en Hiroshima y Nagasaki hasta la creación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) de la Organización de Naciones Unidas (ONU), el principal objetivo de ese organismo fue impulsar un programa de usos pacíficos de la energía atómica, presentando así un desarrollo sostenible para el empleo de energía más limpia y con mejor eficiencia aportando a cumplir diversos objetivos de la humanidad y problemas como calentamiento global o las tensiones geopolíticas relacionadas con la posesión de las materias primas de la energía. Al hablar de energía nuclear no solo nos enfocamos de la fisión nuclear la cual representa el único método conocido de obtención de energía eléctrica mediante procesos nucleares debido que el método opuesto de generación de energía mediante el uso de núcleos atómicos, la fusión está en proceso de investigación, por ello en este artículo se presenta la tecnología actual y futuras tendencias que existe para la generación de energía mediante fusión nuclear. Además, se detallarán aspectos técnicos de los avances actuales del proyecto más representativo de fusión nuclear ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) donde se va a formar Helio por medio de la unión de 2 isótopos del Hidrógeno, Deuterio y Tritio, por la fusión por confinamiento magnético FCM. De igual manera se dará a conocer algunas técnicas de la fusión por confinamiento inercial FCI.

**Palabras claves:** confinamiento inercial; confinamiento magnético; reacción D-T; desarrollo sostenible.

## Abstract

The rapid advances of nuclear energy have faced significant changes during the last years, from its discovery and use for war purposes at the end of the Second World War as what happened in Hiroshima and Nagasaki to the creation of the International Atomic Energy Agency (OIEA) of the United Nations (ONU), the main objective of this organization was to promote a program of peaceful uses of atomic energy, thus presenting a sustainable development for the use of cleaner energy and with better efficiency contributing to meet various objectives of humanity and problems such as global warming or geopolitical tensions related to the possession of raw materials of energy.

When talking about nuclear energy we do not only focus on nuclear fission which represents the only known method of obtaining electrical energy through nuclear processes because the opposite method of energy generation through the use of atomic nuclei, fusion is in the process of research, so this article presents the current technology and future trends that exist for energy generation through nuclear fusion. In addition, technical aspects of the current advances of the most representative project of nuclear fusion ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) will be detailed, where Helium will be formed by the union of 2 isotopes of Hydrogen, Deuterium and Tritium, through fusion by magnetic confinement FCM. Likewise, some techniques of fusion by inertial confinement FCI will be presented.

**Keywords:** inertial confinement; magnetic confinement; D-T reaction; sustainable development.

## Resumo

Os rápidos avanços da energia nuclear têm enfrentado mudanças significativas nos últimos anos, desde sua descoberta e uso para fins bélicos no final da Segunda Guerra Mundial, como o ocorrido em Hiroshima e Nagasaki, até a criação da Agência Internacional de Energia Atômica ( AIEA. ) da Organização das Nações Unidas (ONU), o principal objetivo dessa organização era promover um programa de usos pacíficos da energia atômica, apresentando assim um desenvolvimento sustentável para o uso de energias mais limpas e com melhor eficiência contribuindo para atender diversas objetivos da humanidade e problemas como o aquecimento global ou as tensões geopolíticas relacionadas à posse de matérias-primas para energia. Quando se fala em energia nuclear, não estamos focados apenas na fissão nuclear, que representa o único método conhecido de obtenção de energia elétrica por meio de processos nucleares, pois o método oposto de geração de energia por meio de núcleos atômicos, a fusão, está em processo de sendo pesquisa, por isso este artigo apresenta a tecnologia atual e as tendências futuras que existem para a geração de energia através da fusão nuclear. Além disso, serão detalhados aspectos técnicos do andamento atual do projeto de fusão nuclear mais representativo ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), onde o Hélio será formado através da união de 2 isótopos de Hidrogênio, Deutério e Trítio, por fusão por confinamento. FCM magnético. Da mesma forma, algumas técnicas de fusão por confinamento inercial da FCI serão anunciadas.

**Palavras-chave:** confinamento inercial; confinamento magnético; reação D-T; desenvolvimento

sustentável.

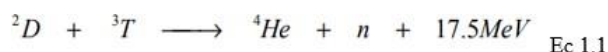
## Introducción

A principios del siglo XX los avances en el campo de la física de partículas tales como: el equivalente de energía y masa  $E=mc^2$  propuestos teóricamente en la relatividad especial (1905) [1] y general (1915) [2] de Einstein, demuestra la obtención de energía por medio de masa, lo cual ha logrado que la humanidad desarrolle nuevas técnicas de generación de energía por procesos nucleares, entre ellas la que más se ha desarrollado es la fisión nuclear, teniendo su apogeo a finales de 1938 en el origen de la segunda guerra mundial, un grupo de investigadores alemanes en el Kaiser Wilhem Instituto de Berlín, integrado por Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner y Otto Frisch, interpretó el fenómeno de la fisión nuclear, a través de la identificación del elemento bario como consecuencia de la escisión del núcleo de uranio [3]. Muy pronto llegaron a la conclusión de que eran resultado de la división de los núcleos del uranio. Se había llevado a cabo el descubrimiento de la fisión. También en 1932 Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo [4]. La energía nuclear de fisión tiene importantes ventajas como las grandes reservas de Uranio, baja contaminación química y ausencia de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la manipulación de los residuos de alta radioactividad representa un complejo problema de ingeniería. Además, existe el riesgo de daño radiológico en caso de accidente de una central nuclear (Chernobil, 1986), La fusión nuclear aparece como una de las principales alternativas a la demanda energética del próximo siglo por su limitado impacto ambiental, su mayor seguridad y la abundancia de los combustibles. En contra tiene su gran complejidad y el importante desarrollo tecnológico que se requiere antes de obtener energía a escala comercial.

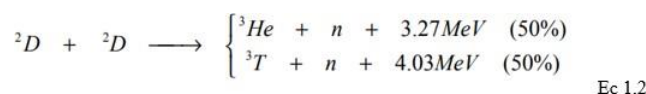
La fusión nuclear, al igual que la energía de fisión, se basa en la producción de energía originada por la transformación de núcleos atómicos. La diferencia fundamental es que mientras en la fisión un núcleo pesado se rompe en núcleos más pequeños la fusión consiste en la unión de dos núcleos ligeros formándose uno de más pesado. La producción comercial de energía de fusión necesita un importante desarrollo tecnológico y un mejor conocimiento de la física del plasma. Pero son diversas las ventajas que hacen muy atractiva la fusión nuclear como el aumento de seguridad y baja producción de residuos ya que el producto de la reacción de fusión es helio un gas inerte y no

radioactivo por lo que no presenta ningún peligro. Para que los núcleos cargados positivamente superen la repulsión electrostática (originada por la fuerza electromagnética) que existe entre ellos y se acerquen lo suficiente como para producir reacciones de fusión a un ritmo adecuado se necesitan temperaturas del orden de los 100 millones de grados. A esta temperatura los electrones se separan del núcleo y como resultado se tiene un plasma con los electrones e iones moviéndose independientemente a gran velocidad. Existen tres tipos de reacciones de fusión nuclear para obtener energía:

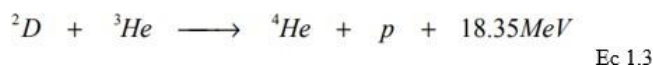
- Deuterio-Tritio (D-T)



- Deuterio-Deuterio (D-D)

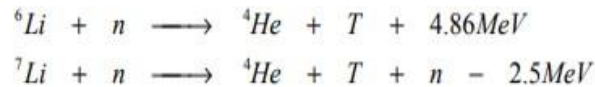


- Deuterio-Helio 3 (D - 3 He)



Siendo la reacción (D-T) más fácil de conseguir porque sus condiciones no son tan complejas, donde los reactantes deben tener una energía cinética de unos 100 keV (correspondiente a una temperatura ligeramente superior a 100 millones K), pero una de sus desventajas es que el tritio no es tan común en la naturaleza y se genera sintéticamente a partir de la irradiación del litio con neutrones. La reacción (D-D) tiene una ventaja respecto a la anterior por no emplear tritio en el proceso, sin embargo, necesita una temperatura 10 veces mayor que la reacción anterior para generar la fusión. En la reacción (D - 3He) no se requiere de tritio y presenta una eficiencia del 80%. Sus principales desventajas es la alta temperatura sobre los 50 keV y la carencia de helio 3 en la tierra, aunque es posible encontrarlo en la luna [5].

Con la tecnología actual una central de energía por fusión nuclear, basar a su funcionamiento mediante la reacción D-T, que en su producción llevar a un 80% de neutrones que serán utilizados para una reacción en cadena que generar a tritio mediante un manto de litio, como se muestra en la siguiente ecuación.



Ec 1.4

Hay que tener en cuenta que a más de tritio se liberara helio y cierta cantidad de energía en MeV y neutrones, lo cual hará que sea una zona de gran radioactividad, por ende, el espesor del manto de litio debe ser lo suficientemente grande del orden de un metro. Por su interior circula el refrigerante que extrae este calor al exterior para producir vapor de agua que finalmente se utilizara para generar electricidad. El tritio producido en el manto se separa del helio y se recupera para inyectar en el plasma como combustible.

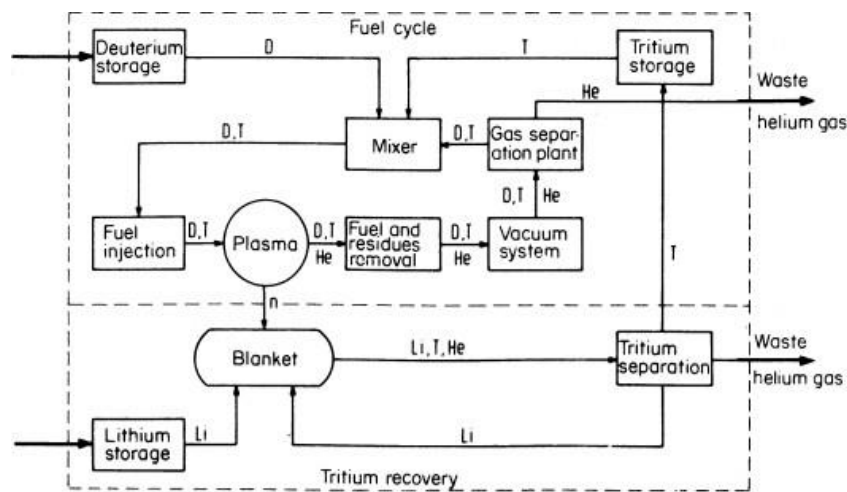


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una central de fusión.

### Introducción a la física nuclear de fusión

Teniendo en cuenta estos hechos experimentales, Thomson propuso un modelo del átomo. Según este modelo el átomo dejaba de ser indivisible, pasando a estar formado por electrones incrustados en una masa de carga positiva. El modelo de Thomson estuvo vigente hasta 1909, año en el que Hans Geiger y Ernest Marsden realizaron un experimento en el que lanzan partículas alfa contra una lámina de oro. Rutherford sugirió buscar partículas alfa que rebotaran al llegar a la lámina.

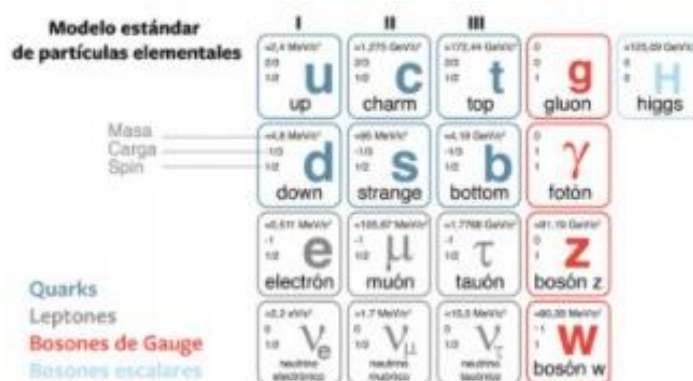


Figura 2. Partículas indivisibles que conforman la materia en base al modelo estándar de la física

### A) El núcleo atómico

Como se ha avanzado en el anterior apartado, el núcleo atómico está formado por protones y neutrones, también llamados conjuntamente nucleones. Conviene tener en cuenta que estos nucleones no son estáticos, como las ilustraciones de los núcleos atómicos dan a entender. Protones y neutrones están en movimiento con energías bien definidas. La interacción fuerte, que es atractiva, es mucho más intensa que la electromagnética, esta repulsiva, lo que confina a los nucleones en el volumen nuclear.

Para hacernos una idea del tamaño del núcleo atómico, diremos que el radio nuclear varía entre uno y diez femtometros. Así mismo, los nucleones son partículas compuestas por tres quarks. Gracias a esto, el hidrogeno pudo originar otros elementos en los primeros instantes del universo y también es el combustible de estrellas como el Sol. Es un buen momento para hablar sobre los diferentes órdenes de magnitud involucrados en la física nuclear de fusión [7].

Tabla 1. Dimensiones de los objetos abarcados por la física nuclear.

Radio de una gigante roja	1010m = 10000000000m
Radio de sol	7,0.1010m = 700000000
Radio de la Tierra	6,371x106m = 6371000m
Edificio del ITER	120M largo x 80m ancho
Edificio del NIF	170m largo x 100m ancho
Radio de plasma en ITER	6,2m
Radio de una cápsula de NF	1mm = 0,001m
Radio de Van de Waals de un átomo de °C	170pm=0,00000000017m
Radio de un núcleo de °C	3fm=0,000000000000003m
Radio de un nucleón	0,9fm=0,000000000000009

## Estabilidad y desintegraciones nucleares

El equilibrio en un núcleo se obtiene gracias a un balance entre la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear fuerte. La fuerza nuclear fuerte, atractiva, actúa a muy cortas distancias, mientras que la fuerza electromagnética, repulsiva entre protones, tiene un largo alcance. Es necesario por tanto que haya un cierto número de neutrones sobre los que únicamente actúa la fuerza nuclear fuerte atractiva para estabilizar el núcleo.

## La fusión nuclear

Llamamos fusión nuclear a la reacción que da lugar a un nucleido con un número másico mayor que el de cada uno de los nucleidos iniciales. Aunque la reacción sea exotérmica, no basta con mezclar deuterio y tritio en un reactor para que esta se produzca. Conviene aquí hacer una analogía con una reacción química. La combustión del fósforo de una cerilla al estar en contacto con el oxígeno del aire es una reacción exotérmica. Es necesaria una energía de activación que en el caso de la cerilla es producido por el rozamiento entre el fósforo y la parte rugosa de la caja [8].

Una vez aportada esta energía la reacción se autosostiene y produce energía que podemos aprovechar. En el caso de la fusión nuclear ocurre algo similar. Para que la reacción se produzca, es necesario que los nucleones estén lo suficientemente cercanos como para que la interacción nuclear fuerte los una, desprendiendo energía. Para ello es necesario que tengan la energía cinética suficiente para acercarse y que se pueda producir la reacción. Se introduce el concepto de los estados cuánticos de un sistema, así como la interpretación de Copenhague, y finalmente se expone el concepto de efecto túnel como medio para conseguir la fusión nuclear. El capítulo continúa definiendo, conceptual y matemáticamente, el concepto de tasa de reacción nuclear y expone la relación que guarda con el concepto de sección eficaz expuesto en el capítulo anterior. Seguidamente, se define el concepto de plasma, denominado el cuarto estado de la materia.

En la misma, el estado de un sistema físico se describe mediante una función de las coordenadas generalizadas del sistema y del tiempo, denominada función de onda, que adopta valores complejos y cuyo módulo elevado al cuadrado,  $|\psi(q,t)|^2$ , define la densidad de probabilidad de las variables en un instante dado. Así, por ejemplo, si dichas variables se reducen a la posición de una partícula entonces es la densidad de probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en un punto e instante dados. Un caso paradigmático es el de la posición y el momento, de tal manera



que la trayectoria clásica de una partícula deja por completo de tener sentido físico. La evolución en el tiempo de la función de onda es descrita por la ecuación de onda.

Se la denomina ecuación de onda porque su estructura formal, en la medida en que recoge los aspectos ondulatorios manifestados por estos sistemas, está relacionada con las ecuaciones de onda de la física clásica. Así pues, donde la física clásica describe comportamientos ondulatorios, la física cuántica agrega aspectos corpusculares y viceversa. Se habla por ello de la dualidad onda-corpúsculo como un atributo esencial de los sistemas mecano-cuánticos. Bohr también señaló en esa conferencia que, mientras en la física clásica un sistema de partículas evoluciona independientemente de que sean observadas o no, en la física cuántica el observador interactúa con lo observado en tal medida que su existencia independiente queda fuera del alcance de las observaciones experimentales [9].

La función de onda de Schrödinger queda así reducida a la categoría de un mero formalismo, útil para la predicción probabilística de los resultados de dichas observaciones dentro un cierto espectro de valores propios. Dentro de un pozo de potencial finito  $V$  si la energía total de la partícula  $E$ , es inferior al potencial,  $V_0$ , la física clásica impide que la partícula pueda salir de dicha región, ya que al ser  $E = V + EC$ , siendo  $EC$  la energía cinética, esta tendría que ser negativa, lo cual es imposible. Sin embargo, la física cuántica encuentra una cierta probabilidad de encontrar a la partícula fuera de los límites establecidos.

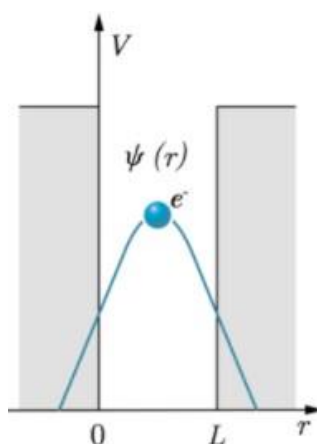


Figura 4. Representación de la función de onda en un pozo de potencial.

El estado de plasma implica la ionización parcial o completa de un material, debido a un calentamiento o a una fotoionización, de tal manera que está formado por iones y electrones, esto es, un estado fluido similar al estado gaseoso constituido por partículas libres cargadas eléctricamente. El plasma presenta características propias que no se dan en los sólidos, líquidos o gases, por lo que es considerado un estado de agregación diferente, conocido como el cuarto estado de la materia. Por su alta conductividad, el interior de un plasma está apantallado frente a campos eléctricos constantes, pero no frente a campos magnéticos constantes, que pueden penetrar en el plasma permitiendo mantenerlo confinado. El plasma es el estado más abundante en el Universo visible [10].

De ello se deduce que un combustible de D - T es básicamente un gas completamente ionizado, es decir, un plasma. Tras las fases iniciales del universo, hace aproximadamente 13 700 millones de años, su materia estaba constituida fundamentalmente por hidrogeno y helios puros y sin ningún otro elemento. Regiones más densas de aquel gas eventualmente colapsaron bajo su propia gravedad produciendo estrellas. Las estrellas produjeron elementos más pesados de los siguientes millones a miles de millones de años. Al final de sus vidas, las estrellas diseminaron los elementos formados en su interior por el espacio mediante las nebulosas planetarias y las supernovas, siendo estas últimas las responsables de la generación de los elementos más pesados que el hierro. Los elementos liberados formaron nuevas estrellas y el proceso continúa hoy. El efecto túnel, consecuencia del comportamiento mecano-cuántico de las partículas, juega un papel esencial en la fusión nuclear ya que, en su ausencia, las temperaturas de fusión que serían necesarias para igualar la barrera de repulsión coulombiana serían extremadamente altas. De esta manera, el efecto túnel es el que permite que las estrellas fusionen elementos, produciendo energía y núcleos más pesados. En el Sol, donde la energía que poseen los núcleos de hidrogeno no es suficiente para superar la barrera coulombiana existe, gracias al efecto túnel, una probabilidad de que algunos protones la sobrepasen, produciendo la fusión de los mismos y liberando energía. Aunque la probabilidad de que se produzca el efecto túnel es muy pequeña, la enorme cantidad de partículas que componen el Sol hace que este efecto se produzca constantemente. En el Sol se fusionan cada segundo 657 millones de toneladas de hidrogeno en 653 millones de toneladas de helio. Los 4 millones de toneladas de diferencia de masa se convierten en energía. A las elevadas temperaturas necesarias para alcanzar las condiciones de fusión, la materia se encuentra en estado de plasma (denominado

el cuarto estado de la materia) que implica la ionización parcial o completa del material, de tal manera que está formado por iones y electrones y presenta propiedades específicas tales como una alta conductividad eléctrica y la aparición de efectos colectivos. El requisito básico de cualquier reactor de fusión nuclear es el de confinar dicho plasma con la temperatura y densidad lo bastante elevadas y durante el tiempo justo, a fin de permitir que ocurran suficientes reacciones de fusión nuclear para obtener una ganancia neta de energía [11]. La condición necesaria para la liberación de energía a partir de un reactor termonuclear viene dada por el llamado criterio de Lawson, que establece que el producto de la densidad de los núcleos en el plasma y el tiempo del confinamiento de este, a la temperatura de ignición apropiada, debe exceder un cierto valor umbral. A presiones mucho más bajas de las conseguidas en el Sol, como son las que podemos conseguir en la Tierra, se requieren temperaturas por encima de 100 millones de grados Celsius para obtener ritmos adecuados de producción de energía de fusión, lo cual exige que el plasma no esté en contacto con el material de las paredes mediante un adecuado confinamiento. Hay dos métodos viables de confinamiento del plasma a escala terrestre: magnético e inercial. En el confinamiento magnético, un plasma de baja densidad se confina mediante campos magnéticos que lo mantienen permanentemente en trayectorias cerradas, existiendo dos diseños posibles en la actualidad: los tokamaks, con forma toroidal, y los stellarators, con forma helicoidal más compleja. En el confinamiento inercial, una diminuta capsula de combustible se comprime inercialmente, generalmente mediante láseres de gran potencia, de manera que el plasma se confina durante muy poco tiempo, pero a densidades extremadamente altas.

### **Fusión por confinamiento magnético**

Para alcanzar la ignición se requiere producir y mantener un plasma confinado durante el tiempo suficiente y bajo las condiciones necesarias como para que se produzca un número suficiente de reacciones de fusión en el seno del combustible. Una de las opciones para conseguirlo es el denominado confinamiento magnético, la solución adoptada por ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). En este capítulo se pretende aportar al lector una visión general del proceso de FCM (Fusión por Confinamiento Magnético). En este mismo apartado de introducción se presentan algunos conceptos generales sobre la fusión nuclear, como lo son el esquema de la planta o el concepto de ignición. A lo largo del siguiente apartado se tratan los fundamentos físicos y tecnológicos básicos de la FCM, como lo son el movimiento de partículas

cargadas en el seno de un campo magnético, los métodos de calentamiento del plasma, las inestabilidades del plasma en una cámara de fusión o la superconductividad. Asentadas las bases, se procederá a describir los detalles de las dos modalidades que en la actualidad se contemplan para la FCM: el tokamak y el stellarator. Se aprovecha luego para describir, en el marco del ciclo de combustible, una parte de la instalación común a todas las metodologías de confinamiento: la planta reproductora de tritio.

Nos encontramos frente a dos opciones para el desarrollo comercial de la fusión nuclear: magnética o inercial. Cada una de ellas tiene su propia tecnología, pero también comparten muchos componentes. La figura 4 presenta el esquema de un reactor de fusión nuclear. Se parte de un plasma de deuterio y tritio, que son los reactivos de la fusión nuclear, en el interior del reactor. Existe una gran abundancia de deuterio en el agua de la Tierra que se puede obtener mediante un proceso de enriquecimiento. No obstante, no sucede lo mismo con el tritio, que no se encuentra en la naturaleza y que se debe obtener a través de medios artificiales como la irradiación de litio con neutrones. Para comprender el funcionamiento de la FCM es necesario saber cómo interactúan las partículas cargadas con los campos electromagnéticos. Esta interacción es la conocida como fuerza de Lorentz, que actúa sobre cualquier partícula cargada que atraviese un campo electromagnético respondiendo a la siguiente fórmula:

$$F = q \cdot (E + v \times B)$$

Ec 1.5

Donde  $F$  es la fuerza que actúa sobre la partícula,  $q$  es la carga de la misma y  $v$  es su velocidad. El campo electromagnético estará definido por sus valores vectoriales eléctrico,  $E$  y magnético  $B$ . Esto significa, que siempre que tengamos un campo electromagnético y existan partículas cargadas podremos influir sobre sus trayectorias variando las componentes  $E$  y  $B$ . Es gracias a esta propiedad de nuestro universo, reflejada en esta ley, que son posibles los confinamientos magnéticos de plasmas. En ausencia de una velocidad paralela al campo magnético, las trayectorias de las partículas cargadas moviéndose en el seno de un campo  $B$  uniforme tendrán una forma circular. Si existe una componente de la velocidad que sea paralela al campo magnético entonces las trayectorias tendrán una forma helicoidal. Este movimiento circular crea pequeñas corrientes circulares que originan campos magnéticos que se oponen a la dirección del campo magnético

aplicado. El radio de esta hélice dependerá de características de las partículas (como la relación carga-masa o su velocidad), así como del propio campo magnético.

Como se ha venido comentando, en la FCM se intenta mantener el plasma confinado mediante campos magnéticos durante el tiempo suficiente para conseguir una ganancia energética aceptable. La base teórica para lograr este efecto consiste en utilizar la fuerza de Lorentz descrita en el apartado anterior para, mediante el campo magnético pertinente, modificar la trayectoria de las partículas cargadas y así mantenerlas en el interior del sistema. Los primeros sistemas en este sentido se diseñaron como cilindros que contenían el plasma, moviéndose las partículas con su componente principal del movimiento en la dirección de su generatriz. El problema inmediato de este diseño radica en la pérdida de masa en los extremos del sistema, por lo que surge de manera natural el siguiente paso, consistente en curvar el cilindro hasta cerrarlo por sus extremos, tornando así el concepto hacia el toro geométrico. En el presente apartado se hará un repaso de las dos principales estrategias que se emplean para lograr el confinamiento durante el tiempo necesario. El ingenio que Igor Yevgenyevich Tamm y Andrei Dmitrievich Sajarov (para la parte histórica ver capítulo 6) diseñaron para contener el plasma se denominó tokamak (Toroidal'naya KAmera s MAgnitnymi Katushkami, es decir, cámara toroidal con bobinas magnéticas). En su configuración básica, el tokamak consiste en un receptáculo toroidal. Alrededor de la cavidad se disponen las bobinas de campo toroidal, que inducen el campo magnético de mismo nombre, cuya forma es semejante a la directriz del toro. Debido a la deriva magnética, este campo no se basta para mantener el plasma en el interior y es preciso añadir un nuevo campo en la dirección poloidal. La forma de generar este campo es inducir una corriente en el propio plasma (que es un medio conductor por estar formado de partículas cargadas). Esta corriente se logra convirtiendo el tokamak en un transformador, situando en su centro el primario de un transformador eléctrico que, a través de una corriente eléctrica monótonamente creciente, provoca a su vez una corriente en la dirección toroidal en el propio plasma (que a su vez se convierte en el secundario del transformador). El campo final resultante es un helicoide que recorre el interior del toro. El principal inconveniente de esta forma de generar el campo poloidal es que la magnitud de la corriente del primario debe hacerse crecer de forma continuada para mantener la inducción, y la imposibilidad de aumentar esta corriente sin límite lleva a funcionar de forma pulsada. Además, se utilizan otras bobinas extra para matizar la forma del campo [12].

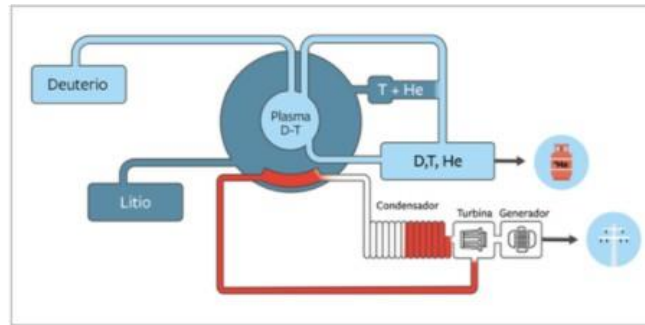


Figura 5. Esquema de una planta de fusión nuclear.

Por su parte el stellarator Del latín stella y generator, literalmente “el generador de estrellas” en alusión a la generación de energía por el mismo proceso que se da en las estrellas, el stellarator es el diseño que Lyman Spitzer propuso en 1951, reaccionando al anuncio del general Perón de que Argentina había logrado controlar la producción de energía por fusión nuclear (ver capítulo 6 para más detalles). La diferencia principal entre el diseño del tokamak y del stellarator radica en la diferente forma de generar la componente poloidal del campo magnético para evitar la deriva del plasma y confinarlo. En el caso del stellarator, esta componente se logra con la forma de las bobinas y su disposición. En los stellarator se tienen bobinas externas helicoidales que confieren un movimiento ondulado al plasma a lo largo del toro. La superficie del flujo no es axisimétrica, sino que varía cíclicamente a lo largo de la dirección toroidal. En la figura 6 se muestra el esquema de un stellarator, donde se ve que la configuración de los solenoides helicoidales es muy compleja [13].

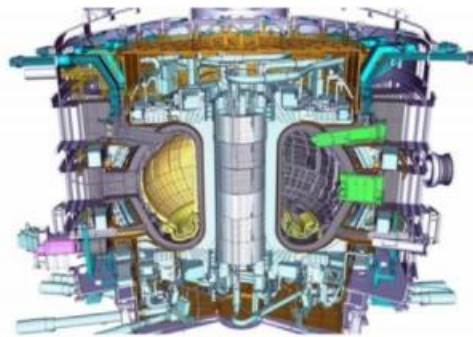


Figura 6. Tokamak.

La diferente forma de disponer y generar los campos magnéticos en los diseños del tokamak y del stellarator hace que presenten ventajas e inconvenientes con respecto a algunas características:

- La forma más constante del tokamak con respecto al stellarator hace que los plasmas sean más estables desde el punto de vista hidrodinámico.
- El stellarator, por otro lado, es capaz de trabajar en modo continuo en lugar de pulsado, lo que mejora la posibilidad de crear una central de producción con buen rendimiento.
- La forma de generar el campo poloidal en un tokamak produce mayores valores de confinamiento, lo que se relaciona directamente con la potencia específica del reactor.
- La contrapartida del punto anterior se da en el stellarator, donde la baja intensidad de la corriente toroidal favorece la ausencia de disrupciones. Las disrupciones con los ELMs requieren máxima atención en el desarrollo de la tecnología tokamak.
- 

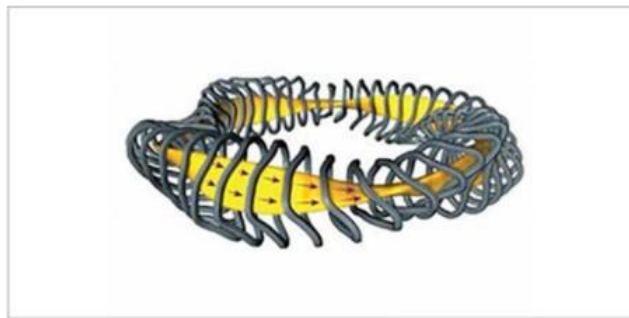


Figura 7. Stellarator.

El ciclo de combustible de una planta de tritio se puede dividir en dos circuitos:

- Circuito primario: En el que se procesa la corriente del gas tritiado que sale de la cámara del reactor.
- Circuito secundario: En el que se regenera y se extrae el tritio que se reinyecta en el circuito primario para ser procesado [14].

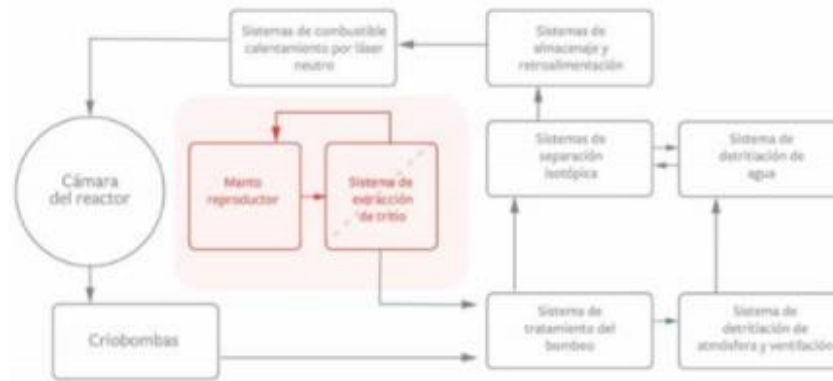


Figura 8. Esquema de una planta de tritio.

### Fusión por confinamiento inercial

Para conseguir alcanzar las temperaturas a las que la fusión nuclear es posible, se necesita calentar la materia hasta transformarla en plasma. Un plasma siempre tiende a expandirse libremente y por tanto se deberá confinar el plasma para mantener un cierto control sobre su densidad y conseguir obtener las condiciones necesarias para su fusión. Confinar implica invertir energía en mantener el plasma a unas ciertas condiciones de presión, densidad y temperatura [16].

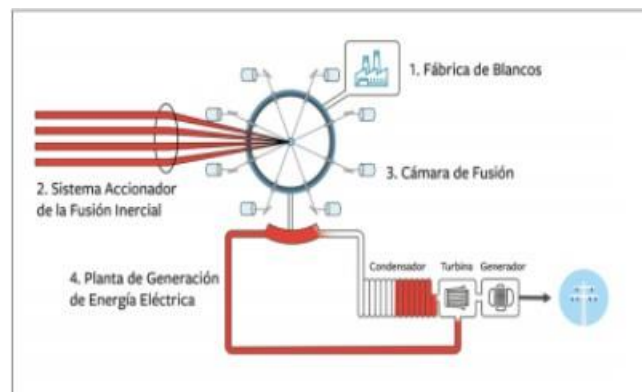


Figura 9. Esquema básico de una planta de fusión nuclear por confinamiento inercial.

### Proceso de ignición

En el proceso de ignición en la FCI, una capsula que contiene en su interior el combustible se comprime por la aceleración que sufre debido a la absorción de gran cantidad de energía. Esta energía se deposita mediante una fuente denominada sistema accionador o driver, que consigue



que la capsula pase a estado de plasma, desplazándose así hacia el exterior. Esta compresión consigue que parte del combustible comience a fusionar, lo cual se asimilara a una ignición del combustible, utilizando como vocabulario común para describir la reacción palabras como quemado o ignición. El proceso más básico de ignición por confinamiento inercial se denomina ignición tradicional o central y es el que se describe en este apartado, para más tarde pasar a describir diferentes conceptos avanzados de ignición que evolucionan a partir de este. Además, la capsula o aquello que recibe la energía del driver en cada esquema investigado se denomina blanco de fusión. En el esquema de ignición tradicional este blanco consiste en una capsula con un diámetro de unos milímetros, que contiene en su interior el combustible. Depósito de energía sobre la capsula que encierra el combustible. La compresión lleva al combustible a densidades del orden de cientos de  $\text{g/cm}^3$  comenzando la ignición [17].

### **Ondas de choque**

Estas ondas tienen ciertas propiedades que deben de tenerse en cuenta a la hora de diseñar el proceso de ignición, por ejemplo, suele resultar más interesante comprimir la capsula utilizando varias ondas de choque en lugar de una sola. De hecho, la palabra laser surge del acrónimo ingles de esta definición light amplification by stimulated emission of radiation.

Un electrón, al absorber la energía incidente de un fotón puede saltar a un nivel de energía superior, encontrándose en un estado excitado. Mas tarde, al retornar al equilibrio, este mismo electrón desciende de nivel energético, emitiendo una onda de luz con la energía que gano al hacer el salto. La teoría cuántica predice que estos niveles de energía son discretos y en un láser lo que se hace es repetir este proceso de excitación y desexcitación entre dos niveles concretos [18].

### **Ignición central con punto caliente o hotspot**

En primer lugar, se discutirá porque es necesaria una ignición con un punto caliente central en la capsula desde un punto de vista energético.

#### **• Energía necesaria - Caso de compresión de toda la masa de combustible.**

Sin embargo, para conseguir la ignición se necesitaría calentar a 5 keV aparte de comprimir, y la energía interna del D - T comprimido a 5 keV es de 6,4 dólares, 108 J/g, lo que proporciona una ganancia de en torno a 300.

#### **• Energía necesaria - Caso de compresión central o Hotspot.**

En el cálculo anterior se ha supuesto que se calentar a toda la masa de combustible, elevando la temperatura y presión de toda la masa hasta alcanzar la ignición en toda ella a la vez. En dicho calculo se ignora el efecto de las partículas alfa, que se producen en la reacción de fusión y cuya energía se deposita principalmente en el propio combustible comprimido y por tanto puede crear una onda de quemado que se propaga por el combustible.

De esta forma, conseguir las condiciones de ignición en un hotspot o punto caliente de radio mucho menor que el del combustible sería suficiente. La energía extra requerida para obtener la ignición de esta manera sería de 6,4 dólares, 108 J/g en un volumen muy reducido de la capsula y por tanto en todo el volumen de la capsula sería de media de 6,4 dólares, 105 J/g suponiendo un radio de hotspot diez veces menor al de la capsula [18].

### Esquemas de ignición directa e indirecta

Esquemas de ignición directa e indirecta. En un esquema de fusión indirecta el láser ilumina un segundo contenedor y es este el que produce la energía necesaria para iluminar la capsula y llevarla a ignición. Prácticamente el único sistema utilizado en ignición indirecta es el hohlraum. En un motor diésel el combustible es comprimido por el pistón hasta causar su ignición. De igual manera, en la fusión inercial tradicional o con ignición central mediante un láser se comprime una capsula que contiene en su interior el combustible y se continúa comprimiendo con la misma fuente de energía hasta que en su interior se produce un punto caliente y en él se produce la ignición del combustible de fusión. Sin embargo, en un motor de gasolina en primer lugar el pistón comprime el combustible, pero la ignición causa una chispa de la bujía. Igualmente, en la fusión rápida se utiliza una fuente de energía para comprimir el blanco y otra para producir la ignición una vez que este comprimido, esta segunda fuente sería la chispa que produce la ignición y suele ser un segundo laser de muy alta intensidad y pulso muy corto [19].

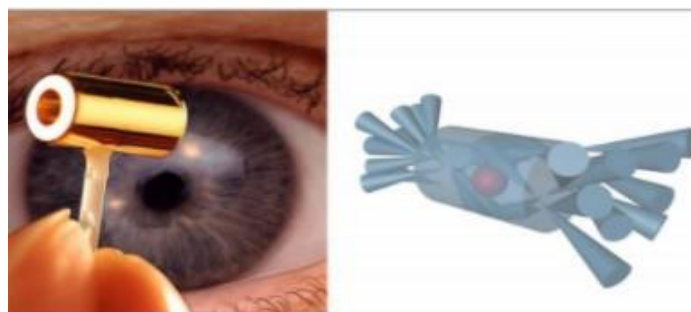


Figura 10. Tamaño de un hohlraum (izda.). Esquema de la ignición indirecta (dcha).

## Esquemas de fusión tradicional y rápida

Una metáfora muy utilizada para ilustrar la fusión rápida es la de comparar un motor de gasolina o encendido provocado con uno diésel o de encendido por compresión. En un motor diésel el combustible es comprimido por el pistón hasta causar su ignición. De igual manera, en la fusión inercial tradicional o con ignición central mediante un láser se comprime una capsula que contiene en su interior el combustible y se continúa comprimiendo con la misma fuente de energía hasta que en su interior se produce un punto caliente y en él se produce la ignición del combustible de fusión. El esquema de ignición tiene tres principales ventajas respecto a los anteriores:

- Ofrece una mayor ganancia de energía al reducirse la utilizada para comprimir el blanco.
- Aporta mayor flexibilidad al separar las etapas de compresión y de ignición. En ignición rápida se pueden crear drivers optimizados para cada una de las dos etapas de elevación de energía, mientras que en una ignición tradicional se siguen los procesos de compresión e ignición utilizando la misma fuente, requiriendo esto llegar a un compromiso entre procesos con diferentes necesidades.
- Como ya se ha comentado el proceso tradicional de ignición requiere mantener una geometría muy precisa antes de la implosión y una elevada simetría. Estos dos requerimientos son mucho menos estrictos en la ignición rápida [20].

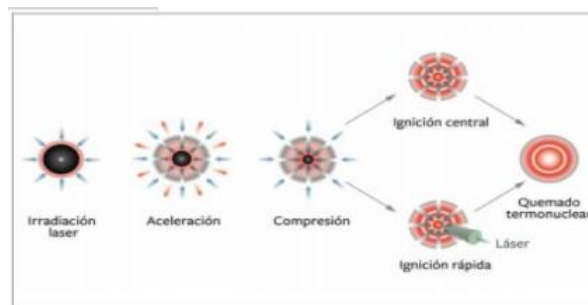


Figura 11. Esquemas de ignición central o tradicional y rápida.

## Retos de la fusión nuclear

Comencemos por recordar algunas siglas que representan los peones avanzados del conocimiento en esta fuente de energía: ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) para la FCM y NIF/LMJ (National Ignition Facility/Laser Megajoule) para la FCI. Siglas que representan los

sistemas experimentales donde se deberán lograr las condiciones que demuestren de manera fehaciente la física de la generación neta de energía mediante la fusión nuclear. En esas instalaciones, que no son reactores de potencia capaces de estar conectados a la red eléctrica suministrando energía, existen todavía muchas dudas e interrogantes [21]. Mas aún queda para aquellas plantas capaces de dar potencia eléctrica útil a la sociedad. ITER supondrá, cuando funcione a pleno rendimiento en el año 2035 según la estimación actual, un sistema con una ganancia energética de  $Q = 10$ , lo que implica una potencia final no continua de 500 MWt frente a los 50 MW previstos para el calentamiento del plasma. NIF o LMJ, ya en funcionamiento total o parcial, deberán demostrar, cuando estén operando de manera apropiada, la obtención de ganancia de energía unidad, o algo mayor, entre las reacciones de fusión nuclear y la energía depositada por el láser. La existencia de estas instalaciones permitirá, además de demostrar que es posible dominar la física de la fusión nuclear en los dos caminos termonucleares posibles, disponer de un banco de pruebas de las bases sobre las que se sustentan las tecnologías de un reactor de potencia.

Ahora bien, este logro fundamental no es suficiente para llegar a la meta de las promesas de energía eléctrica a gran escala por las que la fusión nuclear ha recibido la atención prolongada y multimillonaria de las sociedades. Se necesita también ir dando los pasos necesarios para diseñar y demostrar los sistemas que compondrán el reactor de potencia. Esos retos son los que se van a exponer en este capítulo; algunos habrá que se escapen a este libro por su aparición sorprendente en un futuro próximo [22]. Para lograr una planta de potencia de FCM, quedan por demostrar (por citar algunos ejemplos):

- Tecnología eficiente y de escala de los superconductores que generaran los campos magnéticos deseados.
- La consecución de largos tiempos de confinamiento que lleven al funcionamiento estacionario de un plasma con suficientes reacciones de fusión.
- Definir cuál de las opciones posibles de control del plasma, como son los tokamaks o los stellarator, es la alternativa básica para la escala de planta de potencia.
- La comprensión y eliminación de las interrupciones del plasma y de sus efectos.
- Los materiales capaces de aguantar las cargas térmicas y los efectos atomísticos que se pueden dar en las paredes de la cámara, y de manera muy especial en el divertor.

- El diseño y elección final del manto reproductor de la cámara del plasma donde se produzca la óptima extracción de la energía asociada a las partículas generadas en la fusión, y la reproducción del tritio.
- Regeneración de tritio que alcance no solo a reponer lo gastado, sino a producir al menos un 20 por ciento más.
- Diseño y construcción de la planta de tritio donde se pueda manipular el tritio generado en el manto (sea en matriz solida o en fluido líquido) para obtener la carga sucesiva del combustible de la planta.
- Definición y establecimiento de los niveles de radiactividad en los diversos puntos del sistema,
- logrando demostrar que su valor es inferior a la normativa establecida por los organismos reguladores.
- Definición de los sucesos potenciales por los que el dispositivo pudiera operar en condiciones no seguras [23].

Si nos referimos a la FCI, los logros necesarios para obtener la eficiencia energética del sistema a escala comercial pasan por requerir:

- Blancos de alta ganancia con energía generada por fusión del orden de 50 a 1000 veces mayor que aquella proporcionada por el haz de iluminación.
- Sistema de iluminación eficiente con rendimientos en el rango del 10-30 porciento y tasas de repetición de 5-10 Hz.
- Fabricación de blancos de bajo coste (se estimaba hasta hace poco de 25 centavos de dólar por cada uno) y con una alta tasa de producción (100 millones por año).
- Cámara de reacción de larga vida operativa (del orden de las plantas actuales) y por supuesto con un bajo grado de activación radiactiva.

## Conclusiones

Para alcanzar las condiciones de ignición, es preciso confinar la materia que constituye el combustible en estado de plasma durante un tiempo y con una densidad adecuada. El confinamiento magnético utiliza la fuerza de Lorentz para desviar la trayectoria de las partículas del plasma y mantenerlas en el sistema. Debido a las fuerzas electromagnéticas implicadas, no es suficiente el

campo toroidal para confinar el plasma, y se hace preciso modificar este con una componente poloidal. Ambas apuestan por densidades bajas del plasma durante tiempos considerables.

En la fusión por confinamiento inercial se utiliza un driver en forma de laser para transmitir energía a una capsula que contiene deuterio y tritio en su interior.

Si se cumplen ciertas condiciones termodinámicas el combustible se fusionará, produciendo helio, neutrones y energía. En una hipotética central de fusión inercial se produciría un ritmo constante de igniciones en una cámara de fusión. Los neutrones calentaran la cámara de fusión y esta energía a su vez se transferirá a un refrigerante, siendo este el fluido motor de un ciclo de producción de potencia similar al de cualquier central de producción eléctrica que opera con una turbina.

Existen dos esquemas principales de iluminación y dos esquemas de ignición. La fusión nuclear, en una u otra de sus opciones tecnológicas, es una opción clara e ineludible en el futuro del abastecimiento energético de una sociedad cada vez más demandante de energía.

No parece previsible que esa sociedad que vive en estos momentos bajo un consumo basado en los procesos de transformación de la materia y los recursos naturales, para lo que la energía es imprescindible, rebaje el listón de su demanda. El incremento brutal de su población y las necesidades existentes conmina a las sociedades a la perentoria obligación de considerar el factor energía como algo imprescindible.

No puede ser más cierto en estos momentos, cuando la humanidad se encamina hacia los once mil millones de habitantes al final de siglo, con ya diez mil en el año 2050, y a un desaforado consumo de energía motivado, además, por las migraciones de áreas rurales a urbanas y una duplicación de la demanda de energía prevista en los próximos 40 años, que la necesidad de todas las energías respetuosas con el medioambiente es imprescindible. El logro de ese deseo no es inmediato aun en la fusión nuclear comercial.

## Referencias

- [1] Einstein, A. (1905). Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.
- [2] Einstein, A. (1915). Zur allgemeinen relativitätstheorie. Akademie der Wissenschaften, in "Kommission bei W. de Gruyter.
- [3] Alvarez, W. N. (1999). Utilización de la energía nuclear para el mejoramiento genético de las plantas. Perspectivas Rurales Nueva Epoca.

- [4] Conesa, J. A. (2011). Energía nuclear: fundamentos, reactores, residuos.
- [5] Milanese, M. M. (1989). Investigación sobre los mecanismos de producción de reacciones de fusión nuclear en el plasma focus (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires).
- [6] Curso básico de ciencia y tecnología nuclear. Jóvenes Nucleares. Sociedad Nuclear Española.
- [7] De Becquerel a Oppenheimer. Historia de la energía nuclear. Mariano Mataix. Senda Editorial S. A.1988.
- [8] La bomba atómica: El factor humano en la Segunda Guerra Mundial. Natividad Carpintero. Ediciones Díaz de Santos, 2007 [4] Física Nuclear. Unidad didáctica. U. N. E. D
- [9] Fusión Nuclear, J. M. Perlado, O. Cabellos, A. Rivera
- [10] Plasma Physics and Fusion energy, Jeffrey Freidberg.
- [11] Plasma Physics, Justin Wark.
- [12] J. M. Perlado y O. Cabellos, "Fusion nuclear", Master de Ciencia y Tecnología Nuclear de Universidad Politécnica de Madrid, 2009
- [13] International Atomic Energy Agency, Summary of the ITER final design report, July 2001.
- [14] Design requirements and guidelines level1, G A0 GDRD 2 01-07-13 R 1.0.
- [15] N. Moral, D. Garoz, O. González-del Moral, J. Álvarez, J. M. Perlado, "Tritium diffusion challenges for future nuclear fusion reactors", 25th Symposium on Fusion Engineering, IEEE 10-14 June 2013 doi:10.1109/SOFE.2013.6635392.
- [16] R. P. Drake, High-Energy-Density Physics: Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics. Springer Science Business Media, 2006.
- [17] M. Cotelos Ferreiro, "Análisis de ecuaciones de estado para alta densidad de energía." 2009.
- [18] A. Rivera, "Tecnología Nuclear, ETSII, UPM." 2015.
- [19] Fusion Energy Sciences Advisory Committee and for the Office of Science of the U. S. Department of Energy, OPPORTUNITIES IN THE FUSION ENERGY SCIENCES PROGRAM.1999.
- [20] J. Lindl, Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive. Peshawar, Pakistan; New York, NY, USA: American Institute of Physics, 1998.

- [21] J. M. Perlado, Alfa 26 — IV — pp. 24-33, 2014.
- [22] J. L. Miquel, presentacion en IAEA FEC Kyoto 2016.
- [23] R. Freeman, March 30, 2011.
- [24] R. Betti et al., Phys. Rev. Lett. 98, 155001 (2007).
- [25] Petrescu, R. V., Aversa, R., Kozaitis, S., Apicella, A., Petrescu, F. I. (2017). Some proposed solutions to achieve nuclear fusion. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 10(3).
- [26] Ongena, J., Ogawa, Y. (2016). Nuclear fusion: Status report and future prospects. Energy Policy, 96, 770-778.
- [27] Garcia, J., Dumont, R. J., Joly, J., Morales, J., Garzotti, L., Bache, T. W., ... Mailloux, J. (2019). First principles and integrated modelling achievements towards trustful fusion power predictions for JET and ITER. Nuclear Fusion, 59(8), 086047.
- [28] Pines, V., Pines, M., Chait, A., Steinetz, B. M., Forsley, L. P., Hendricks, R. C., ... Becks, M. D. (2020). Nuclear fusion reactions in deuterated metals. Physical Review C, 101(4), 044609.
- [29] Tanabe, T. (Ed.). (2017). Tritium: Fuel of fusion reactors. Springer Japan.