

Escuela Politécnica de Ingeniería
de Minas y Energía

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Estudio de Viabilidad de la Fusión Nuclear
como Futura Fuente de Energía**

(Feasibility study of nuclear fusion
as a future energy source)

Para acceder al Título de:
**GRADUADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
ENERGÉTICOS**

Autor: D. Santiago Salguero Pereda

Director: D. José Ángel Mier Maza

Coordinador: D. Raúl Husillos Rodríguez



Índice General

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Mix Energético: Evolución y Actualidad	13
1.2. Las Energías Convencionales y su Agotamiento	16
1.3. Historia de la Energía Nuclear	18
· 1.3.1. La energía de Fisión Nuclear	20
· 1.3.2. La energía de las Estrellas: la Fusión Nuclear	23
1.4. Concepción de la Energía Nuclear en la Sociedad Española	27
2. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO	31
3. ESTADO DEL ARTE	33
3.1. Análisis teórico	34
· 3.1.1. La fusión nuclear en la naturaleza.....	37
· 3.1.2. Tipos de confinamiento de un plasma	40
○ 3.1.2.1. Confinamiento gravitatorio.....	41
○ 3.1.2.2. Confinamiento inercial	42
○ 3.1.2.3. Confinamiento magnético.....	44
· 3.1.3. Principales reactores de fusión nuclear por confinamiento magnético	45
· 3.1.4. Reactores Tokamak experimentales: presente y futuro	48
3.2. Análisis científico	54
4. METODOLOGÍA.....	58
5. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DEL ESTUDIO	62
6. CÁLCULOS REALIZADOS.....	64
6.1. Resultados Obtenidos	65
6.2. Comparativa: Fusión vs Fisión	72
7. CONCLUSIONES	73
8. BIBLIOGRAFÍA	76
8.1. Bibliografía	77
8.2. Webgrafía	77
8.3. Otros documentos de Apoyo	78



Índice de Figuras

Figura 1 - Sol, estrella de nuestro sistema solar, reactor de Fusión Nuclear por confinamiento gravitatorio. FUENTE: http://www.elmundo.es/elmundo/2007/10/04/ciencia/1191487480.html	12
Figura 2 - Evolución del Mix Energético en España. FUENTE: www.ree.es	13
Figura 3 - Cobertura de la demanda en España en 2013 (246 TWh). FUENTE. www.ree.es	13
Figura 4 - Evolución estipulada hasta 2020 del Plan de Energías Renovables de España. FUENTE: IDAE	15
Figura 5 - Periodo de semidesintegración de diferentes elementos. FUENTE: Universidad Popular Carmen de Michelena Tres Cantos	17
Figura 6 - Central termosolar de acumulación por sales de La Africana Energía, en Córdoba, España. FUENTE: http://www.africanaenergia.es/	18
Figura 7 - Átomo como forma más pequeña de la materia, indivisible. FUENTE: http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad2/modelos_atomicos/modelo_dalton	18
Figura 8 - Diferentes modelos atómicos. FUENTE: http://www.eis.uva.es/~qgintro/atom/tutorial-04.html	19
Figura 9 - Modelo atómico. FUENTE: https://www.youtube.com/watch?v=zF-MX-VxnGE	19
Figura 10 - Fisión de Uranio-235 y productos. FUENTE: http://www.quimicas.net/2015/08/la-fision-nuclear.html	20
Figura 11 - Proceso de enriquecimiento del Uranio. FUENTE: http://www.girabsas.com/nota/4373/	22
Figura 12 - Esquema de un reactor BWR. FUENTE: http://www.nucleartourist.com/type/bwr.htm	22
Figura 13 - Esquema de un reactor PWR. FUENTE: http://www.nucleartourist.com/type/pwr.htm	23
Figura 14 - Fusión nuclear del Deuterio y del Tritio. FUENTE: http://quimica01robincueva.blogspot.com.es/	23
Figura 15 - Reactor nuclear de fusión nuclear por confinamiento gravitatorio (estrella Sol). FUENTE: http://www.elmundo.es/elmundo/2007/10/04/ciencia/1191487480.html	24
Figura 16 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento magnético. FUENTE http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm	25
Figura 17- Reactores tipo Tokamak y Stellarator. FUENTE: http://www.economist.com/news/science-and-technology/21676752-research-fusion-has-gone-down-blind-alley-means-escape-may-now-be	25
Figura 18 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE: http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_3/ciencia3/135/htm/sec_5.htm	26
Figura 19 - Ejemplo de reactor de fusión fría. FUENTE: http://naukas.com/2012/11/07/aunque-la-lenr-se-vista-de-seda-fusion-fria-se-queda/	27
Figura 20 - Manifestación en contra de las centrales nucleares. FUENTE: http://www.terra.org/categorias/articulos/sin-nucleares-tendremos-un-mundo-mas-sano-mas-limpio-y-mas-seguro	28



Figura 21 - Central nuclear de Fukushima en ILLAS. FUENTE: https://redfilosoficadeluruguay.wordpress.com/2015/12/19/la-pesadilla-de-fukushima-no-ha-terminado/	29
Figura 22 - Pros y contras de la energía nuclear mediante fisión. FUENTE: http://www.forumlibertas.com	30
Figura 23 - Balance de masas entre reactivos y productos de la reacción de fusión nuclear, ese defecto másico entre ambos es el que se convierte en energía. FUENTE: http://fusionpower.org/InformationFusion.html	34
Figura 24 - Sección eficaz de fusión en función de la energía de isótopos del hidrógeno. FUENTE: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm	35
Figura 25 - Energía de enlace por nucleón. FUENTE: https://sites.google.com/site/fisica2palacios/fisica-moderna/fisica-nuclear	36
Figura 26 - Estrella Sol, centro del sistema solar. FUENTE: NASA.....	37
Figura 27 - Ejemplo de efecto túnel cuántico. FUENTE: http://triplenlace.com/2013/07/07/el-efecto-tunel-explica-que-se-den-en-el-espacio-reacciones-quimicas-que-no-se-producen-en-condiciones-normales/	38
Figura 28 - Criterio de Lawson. FUENTE: http://science.fusion4freedom.us/nuclear-fusion-reactors/	41
Figura 29 - Estrella, ejemplo de reactor de fusión nuclear por confinamiento gravitatorio. FUENTE: NASA.....	41
Figura 30 - Cápsula de DT para el confinamiento inercial. FUENTE: http://francis.naukas.com/2012/01/09/la-ignicion-de-la-fusion-por-confinamiento-inercial-queda-fuera-de-la-agenda-del-nif-para-2012/	42
Figura 31 - Pasos a seguir en la fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE: http://www.astrofisicayfisica.com/2014/02/la-fusion-nuclear-por-confinamiento.html	42
Figura 32 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE: https://portalhispano.wordpress.com/tag/fusion-nuclear/	43
Figura 33 - Iones moviéndose alrededor de las líneas de campo magnético helicoidalmente e iones moviéndose sin líneas de campo magnético. FUENTE: http://www.scienceinschool.org/node/2837	45
Figura 34 - Ejemplo de confinamiento mediante campos magnéticos. FUENTE: http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/magnetic/toroid.html	45
Figura 35 - Esquema de un tokamak en el que se muestra la inducción de corriente al plasma gracias a un trafo primario devanado. FUENTE: http://lukyrh.blogspot.com.es/2016/01/seaan-rojos-y-teoricos-intelectuales.html	46
Figura 36 - Esquema del reactor Stellarator Helicoidal flexible TJ-II. FUENTE: http://fusionsites.ciemat.es/tj-ii/	47
Figura 37 - Diferencias de un reactor tokamak a un reactor stellarator. FUENTE: http://www.economist.com/news/science-and-technology/21676752-research-fusion-has-gone-down-blind-alley-means-escape-may-now-be	48



Figura 38 - Interior del horno del reactor JET. FUENTE: http://www.abc.es/ciencia/20130707/abci-supermaquina-fabrica-energia-fusion-201307062226.html	49
Figura 39 - Ratio de potencias de los diferentes reactores, incluido el ITER. FUENTE: http://physicsworld.com/cws/Articles/ViewArticle.do?channel=news&articleId=24295 . 50	50
Figura 40 - Ensamblaje de la cámara del reactor. FUENTE: https://www.iter.org/construction/construction	51
Figura 41 - Entes constructores de los diferentes elementos del reactor. FUENTE: http://www.agenciasinc.es/Reportajes/El-ITER-avanza-lento-pero-seguro	52
Figura 42 - Línea cronológica para la ejecución de DEMO (inexacta). FUENTE: CERN	53
Figura 43 - Posible esquema de funcionamiento de DEMO. FUENTE: http://www.conicit.go.cr/boletin/boletin75/plasmas_fusion_nuclear2.html	53
Figura 44 - Datos introducidos en la primera búsqueda.....	55
Figura 45 - Ejemplo de construcción del reactor experimental ITER. FUENTE: https://www.iter.org	63



Índice de Tablas

Tabla 1 - Valores típicos de las magnitudes características en dependencia de los distintos tipos de confinamiento.	41
Tabla 2 - Comparativa entre el JET y el ITER. FUENTE: http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/iter/iter02.htm	52
Tabla 3 - Número de artículos encontrados usando los diferentes criterios de búsqueda.	55



AGRADECIMIENTOS



Quisiera agradecer en primer lugar tanto a D. José Ángel Mier Maza como a D. Raúl Husillos Rodríguez por la predisposición, el esfuerzo, tiempo y dedicación mostrada para que la realización de este trabajo haya sido llevada a cabo. Sin su ayuda esto no hubiera sido posible.

También agradecer a todos mis compañeros por los buenos ratos pasados y el apoyo transmitido, en especial a Rubén Plano San Martín, José Alfredo López Uzquiza, Razvan Pascal, Gloria Torre Bermejo y Juan Urresti de las Alas-Pumariño, sin los cuales estos años no habrían sido lo mismo.

Agradecer además a la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía por la formación brindada, sin la cual no podría haber llegado hasta aquí.

En el ámbito personal, también me gustaría agradecer las tardes de entrenamiento, tanto en la EDM de Judo como en el gimnasio Curling's, ayudándome muchas veces a desconectar y a verlo todo desde otra perspectiva, la del sacrificio.

A mis amigos agradecer todo el apoyo brindado durante estos años, esos momentos en los que mientras estábamos de fiesta, entre ron y whiskey, teníamos nuestras divagaciones sobre todos los aspectos de la vida. También por la de horas y momentos pasados, tanto dulces como amargos, llegándolos a considerar como hermanos.

Por último y más importante, quiero agradecer a mi familia todo el apoyo brindado durante estos años. A mi novia Cris, por todas las horas que me ha tenido que aguantar malhumorado y con estrés para conseguir terminar y por su cariño y apoyo brindado. A mis padres, porque sin ellos no hubiera llegado ni de lejos hasta aquí, habiéndome brindado lo mejor de cada uno. A mi abuela, por apoyarme en todo momento, considerándola como una segunda madre, permitiéndome muchas veces caprichos que no merecía. A mis tíos Toño, Begoña y Eva, que siempre han estado pendientes de mí y de cómo iba todo y a mis primos Ruth y Jorge, que me han apoyado siempre, considerando a Ruth como la hermana que nunca tuve.

A todos, de todo corazón, gracias.



RESUMEN



Las energías convencionales llegan a su agotamiento. Esto es así debido a que las reservas de combustibles fósiles y de otros materiales como el uranio no pueden renovarse con una velocidad igual o superior a la de consumo. Por ello, a día de hoy se están realizando diferentes investigaciones en el terreno de la energía con el fin de que, cuando llegue el día en el que el carbón, el petróleo o el uranio se agoten, se pueda mantener una producción energética que cubra el consumo que genera el ser humano con sus actividades.

A su vez, la producción energética está compuesta de varios tipos de generación. El mayor problema radica en la generación base, que es aquella generación que hace mantenerse estable durante el tiempo, independientemente de las circunstancias meteorológicas. Esto hace que la tecnología para sustituir este tipo de generación ha de ser una tecnología que supla al sistema de una gran cantidad de energía constante mantenida en el tiempo, sin más interrupciones que las propiamente programadas para labores de mantenimiento. Por todo ello, se plantea el análisis de la fusión termonuclear como sustituto ideal a esas fuentes de generación energética.

La fusión nuclear se caracteriza por ser la fusión entre núcleos de elementos ligeros que, en las condiciones idóneas, desprenden una cantidad ingente de energía. Normalmente dichos elementos ligeros suelen ser el Hidrógeno y sus isótopos y el Helio. Una estrella, por lo tanto, es un ejemplo de reactor de fusión nuclear por confinamiento gravitatorio. A su vez, existen otros dos tipos de confinamiento: inercial y magnético.

Aquel al cual se le prevé un mayor índice de éxito para la producción energética del ser humano es la magnética, puesto que es la que puede suministrarnos energía de forma más continua mediante la tecnología de la que disponemos. Proyectos como el ITER tratan de demostrar la viabilidad de este tipo de energía.

Pero uno de los mayores problemas que presenta la energía nuclear es la mala concepción social que a día de hoy tiene, debido fundamentalmente a los accidentes acaecidos en Chernobyl o Fukushima, y a la potencia que las armas nucleares son capaces de liberar. Además, las actuales tecnologías de generación de energía mediante la fisión nuclear generan una cantidad de residuos ingente, haciendo que la sociedad vea la fusión como algo que, si no es igual, al menos pudiera llegar a ser parecido.

Por ello, es necesario la definición de la viabilidad de la fusión nuclear, contemplando diferentes puntos de vista, tanto técnicos, sociales, medioambientales, etc. Con el fin último de demostrar que la fusión nuclear será la luz que ilumine nuestro futuro energético.

Palabras clave: “energía”, “generación base”, “fusión nuclear”, “viabilidad”.



1. INTRODUCCIÓN



En la actualidad, la producción energética evoluciona conforme lo hacen los requerimientos de la humanidad en materia energética. Es innegable que la humanidad vive en una sociedad cada vez más avanzada tecnológicamente, lo que hace que la necesidad de abastecimiento energético sea cada vez mayor. Con el paso del tiempo, se ha visto que el actual sistema energético tiene fecha de caducidad, puesto que está sustentado en su amplia mayoría por energías de fuentes no renovables como pudiera ser el petróleo o el uranio. Por ello, y conforme dichos recursos energéticos se vayan agotando, se necesitará pasar a otro modelo de producción energética. Dicho modelo ha de tener en cuenta la creciente sensibilidad social con el medio ambiente, puesto que el actual modelo es un modelo altamente dañino debido a las grandes cantidades de contaminantes que se vierten. En esa tónica, y respetando un sistema equilibrado entre centrales de producción para la producción energética ya sea en base, en punta, en media punta o demás, se ha de desarrollar un sistema que sustituya a cada una de las actuales no renovables.

Por ello, existe un sistema de producción energética, todavía en fase experimental, que sería aquel que podría solucionar los problemas de abastecimiento energético para la humanidad. Dicho sistema estaría basado en el principio de la Fusión Nuclear, algo que la naturaleza, en su inmensa sabiduría, es capaz de utilizar para crear los gigantescos reactores de fusión termonuclear conocidos como estrellas.

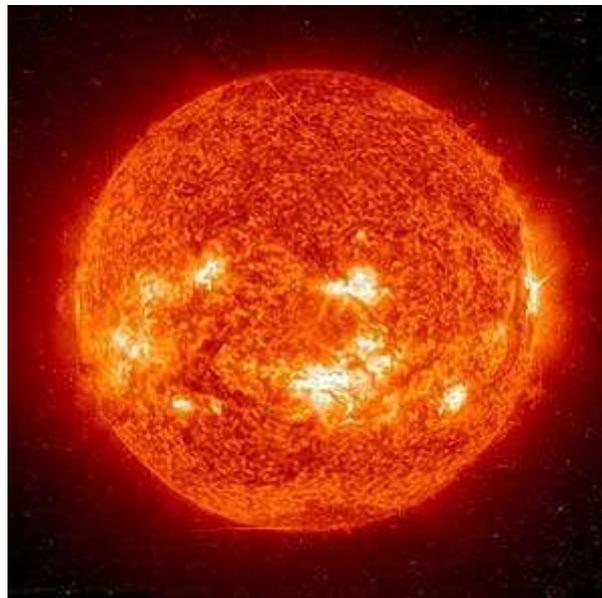


Figura 1 - Sol, estrella de nuestro sistema solar, reactor de Fusión Nuclear por confinamiento gravitatorio. FUENTE: <http://www.elmundo.es/elmundo/2007/10/04/ciencia/1191487480.html>

Por lo tanto, se puede definir este sistema de producción energética como el sistema de producción del universo, puesto que la energía generada por las estrellas es de este tipo. En conclusión, si se aprovecha dicha energía, entramos en el campo de la energía nuclear, y más concretamente, en el campo de la energía de fusión nuclear.



1.1. Mix Energético: Evolución y Actualidad

La expresión Mix Energético alude a la combinación de las producciones energéticas de las diferentes fuentes de energía para cubrir la demanda eléctrica de un determinado territorio, generalmente países. Según la zona que se analice la distribución del mix energético será diferente, en dependencia de los tipos de energía mayoritaria que se consuman.

En el caso que nos ocupa, se analizará el mix energético español viendo también un poco del mix energético global y analizando sus fortalezas y debilidades.

Para ubicarse previamente, uno de los mayores problemas en la actualidad es la crisis económica que se está enfrentando a nivel global. Este hecho contribuye negativamente en el ratio de demanda energética, puesto que, al haber un flujo de dinero menor, se tiende a optimizar el uso cotidiano de la electricidad. Gracias a esto, uno de los problemas que se planteaba con anterioridad en lo referente al mix energético se ve postergado, siendo el inconveniente de las energías convencionales (petróleo, carbón, etc.) el alto ratio de producción de CO₂ y gases de efecto invernadero, tan nocivos para el medio ambiente.

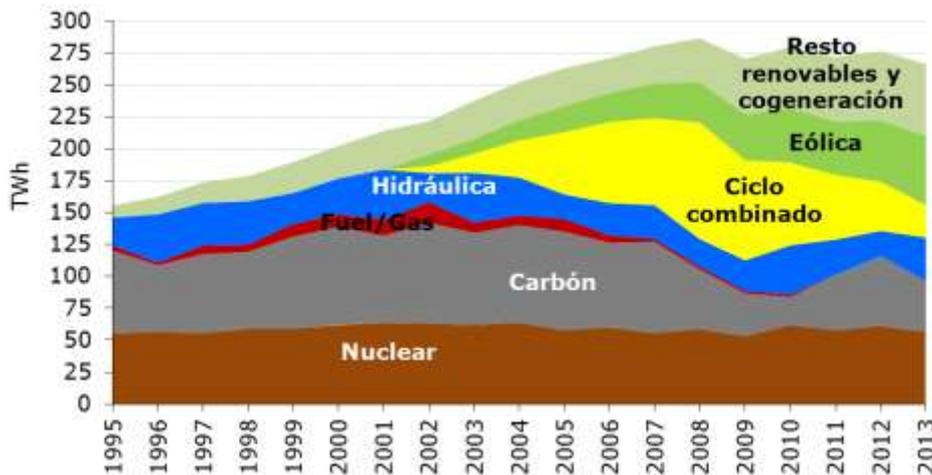


Figura 2 - Evolución del Mix Energético en España. FUENTE: www.ree.es

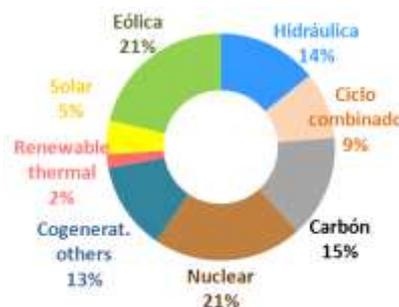


Figura 3 - Cobertura de la demanda en España en 2013 (246 TWh). FUENTE: www.ree.es



En la Figura 2 podemos observar la serie evolutiva del mix energético entre los años 1995 y 2013, ambos inclusive. En la Figura 3 podemos observar los porcentajes del mix energético español en el año 2013. De ambos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La primera, y más obvia, es la evolución de las diferentes energías:

- El parque de generación nuclear se ha mantenido constante debido a legislaciones (Moratoria Nuclear)¹ que impiden la ampliación de éste con nuevos reactores. Los picos en producción son originados por las paradas rutinarias de las centrales nucleares, así como paradas para la mejora de éstas.
- La producción mediante carbón tuvo un máximo durante el inicio del siglo, pero se ha ido reduciendo considerablemente. Eso es atribuible a dos factores, uno de ellos es la gran cantidad de gases nocivos y de efecto invernadero que produce su quema y el otro es que la industria del carbón español está debilitándose, siendo un carbón con unas propiedades más bien malas, necesitándose la importación de dicho material.
- La energía eléctrica mediante generación hidráulica se mantiene más o menos constante en el tiempo, esto se da por dos grandes razones: 1) Es hartamente imposible la construcción de grandes embalses en España debido a que están todos construidos y 2) depende de las precipitaciones en las estaciones húmedas.
- Cuando hablamos del ciclo combinado², hemos de tener en cuenta también la coyuntura económica del país. Fueron centrales construidas para regular mejor el sistema eléctrico y como sistemas de respaldo a las energías renovables³. En la actualidad hay instalados cerca de 23.5 GW.

¹ La Moratoria Nuclear fue un apartado del Plan Nacional Español de 1983 (PEN-83) aprobada bajo el mandato del socialista Felipe González en 1984 la cual hacía que se parara de construir centrales nucleares y, de los reactores que había en ese momento proyectados, sólo 2 se pudieran llevar a buen término. Éste plan fue aprobado y promovido por diversas razones, una de las cuales, y seguramente la más importante, sea el rechazo social que por aquel entonces originaba la energía nuclear.

² Las centrales de ciclo combinado son centrales que trabajan con doble ciclo termodinámico, los ciclos termodinámicos son los ciclos Brayton, usado en turbinas de gas, y Rankine, usado en las turbinas de vapor de agua. Dos de las ventajas que proporcionan las centrales de ciclo combinado son la flexibilidad de carga en operación y el elevado rendimiento del sistema.

³ La ley hace que, cuando se quiere construir una determinada central de carácter renovable de una determinada potencia se ha de respaldar con la construcción de una central de otro tipo de la misma potencia. Esto se hace para darle estabilidad al sistema, tanto de capacidad productiva como de respuesta ante la demanda.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

- Cuando hablamos del parque eólico español, estamos hablando de un parque de reciente creación, puesto que lo que había con anterioridad era más que nada experimental. El crecimiento de esta energía desde el año 2000 denota la apuesta por un modelo productivo sostenible y limpio, pero que a su vez tiene trampa: la energía eólica depende de la velocidad incipiente del viento, pudiendo no ser ésta la necesaria por exceso o defecto para cubrir la demanda en un determinado instante. A su vez, como depende de la velocidad del viento, introduce pequeñas oscilaciones en la frecuencia de la red.

- Del resto de renovables, podemos destacar que, en España, y sobre todo en el sur, la cantidad de horas de sol que hay, así como de irradiación que éste produce, es ingente. Y se muestra además un claro crecimiento de éste tipo de energías debido a ello y a la proliferación de otro tipo de centrales. A su vez, la ley aprobada en estos últimos años, penaliza de forma injusta a los pequeños productores solares de autoconsumo.

La segunda conclusión a extraer es que se debe incentivar un modelo energético mucho más respetuoso con el medio ambiente. El gran porcentaje, aun a día de hoy, de producción energética gracias a combustibles fósiles es inviable. Para ello, se ha tratado de realizar un modelo mucho más acorde para los años venideros, el cual se tratará de alcanzar en la medida de lo posible.

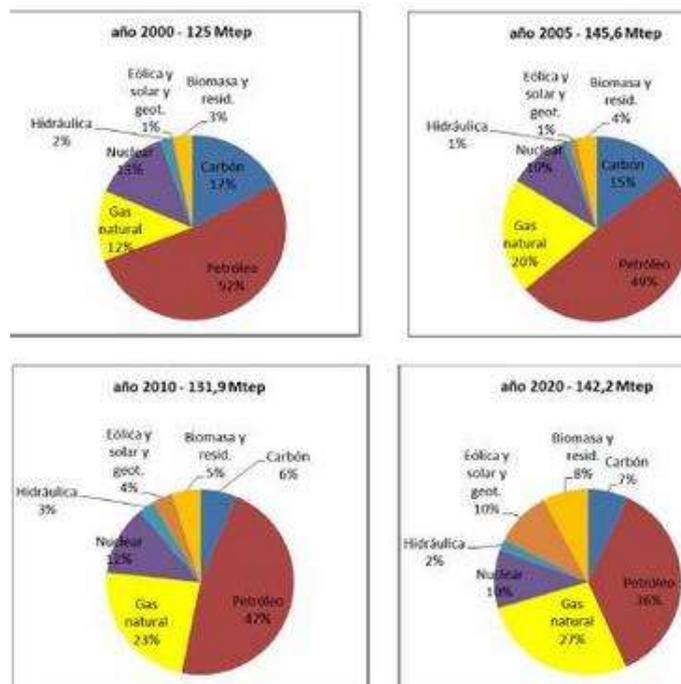


Figura 4 - Evolución estipulada hasta 2020 del Plan de Energías Renovables de España. FUENTE: IDAE



1.2. Las Energías Convencionales y su Agotamiento

Cuando se habla de energías convencionales se habla de aquellos tipos de fuente de energía que se encuentran de forma limitada en la naturaleza y las cuales no son posibles su regeneración⁴. Dentro de este tipo de energías se engloban aquellas cuyas fuentes de energía son el uranio, el carbón, el gas o el petróleo.

Se ha de mencionar que son fuentes de energía condenadas a la extinción, debido a las reservas que ellas mismas presentan y al uso abusivo que se les da. Si bien, cada fuente de energía convencional presenta sus propios problemas, todas ellas comparten un mismo y acuciante problema: el tiempo.

El tiempo, en su más estricta evolución, hace que éste tipo de fuentes de energía sean caducas. Esto se basa en que el petróleo, por ejemplo, cuenta con unas reservas máximas estimadas, que podrán evolucionar a más si se descubre algún pozo nuevo, que tienen una cantidad máxima de combustible. Si bien se podrán mejorar los sistemas de extracción, de refinado y aumentar la eficiencia a valores cercanos al 100% (cosa harto improbable), el uso de este tipo de fuente hace que tenga los días contados. Si bien existen diferentes controversias sobre cuántas reservas quedan de estas fuentes y para cuántos años de producción en función del ratio de producción, la gran mayoría coincide en que todas habrán llegado a su fin para 2100.

Una vez analizado el problema conjunto en el tiempo que presentan las fuentes de energía convencionales, cabe destacar que presentan problemas adicionales. Podemos englobar estos problemas en dos grandes campos:

- Uno de ellos es la creación de gases nocivos. Dentro de las fuentes que crean dichos gases se encuentran aquellas de procedencia orgánica o combustibles fósiles que se queman. Dichos gases son:
 - El vapor de agua, siendo el más generado por la quema de combustibles fósiles. Es un gas de efecto invernadero, que actúa por tanto acentuando el cambio climático (a mayor vapor de agua se forman más nubes las cuales hacen que haya más precipitaciones, al haber mayor temperatura, se evapora y retroalimenta).
 - El CO₂ o Dióxido de Carbono, siendo un componente importante en la atmósfera. Se estima que desde la revolución industrial se ha aumentado su concentración aproximadamente en un 43%, siendo además el principal gas de efecto invernadero.

⁴ Cuando hablamos de la regeneración de una fuente de energía, estamos hablando de que esa fuente vuelva a estar disponible en una determinada escala de tiempo. El problema es que, con las fuentes de energía no convencionales, la escala de tiempo es de miles de años, siendo inviable para la producción humana.



- Los NO_x u Óxidos de Nitrógeno son aquellos elementos originados en la quema de un combustible por la asociación del nitrógeno y el oxígeno. Son los responsables mayoritarios de la lluvia ácida, formando ácido nítrico, o los responsables de la niebla “smog”.

- Otro gran problema asociado a los combustibles nucleares es el almacenamiento del combustible nuclear usado, es decir, del uranio empobrecido que ya no genera la cantidad necesaria de fisiones como para que sea rentable su uso. Éste no es tanto un problema medioambiental (que lo es porque su liberación en el medio ambiente provoca que la zona directamente afectada cree una atmósfera letal para el ser humano) sino de almacenamiento. El problema del almacenamiento es debido a que esos residuos estarán bajo desintegración nuclear durante miles de años, liberando radiación hasta que no quede en su interior ningún núcleo radiactivo. Debido a este peligro potencial en caso de accidente (terremoto, tsunami, etc.), el problema que se origina por el almacenamiento del combustible nuclear radiactivo es el de saber en qué sitio y de qué forma va a ser almacenado hasta que la tecnología permita hacer algo con ello, ya sea un reprocesado o algo para poder evitar posibles fugas radiactivas.

¿PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN?

Tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de un radioisótopo

Uranio-235	7,038·10 ⁸ años	Uranio-238	4,468·10 ⁹ años	Potasio-40	1,28·10 ⁹ años
Radio-226	1620 años	Cesio-137	30,07 años	Bismuto-207	31,55 años
Yodo-131	8,02 días	Radón-222	3,82 días	Oxígeno-15	122 segundos

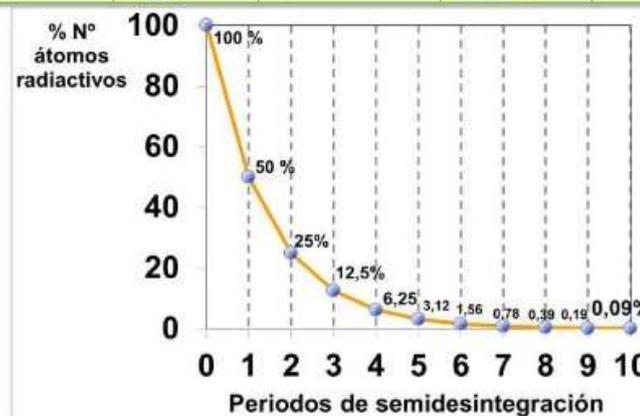


Figura 5 - Periodo de semidesintegración de diferentes elementos. FUENTE: Universidad Popular Carmen de Michelena Tres Cantos



Entonces, visto que las energías convencionales son, a escala humana, percederas, es necesaria la implementación de un tipo de energía que las sustituya en su totalidad, haciendo además que sus efectos adversos se vean reducidos en su totalidad, o al menos, casi en su totalidad.

Por ello, la conveniencia del desarrollo de las centrales termosolares con acumulación o la energía de fusión nuclear son los pilares de las energías de futuro, puesto que son limpias, seguras e inagotables en el tiempo.



Figura 6 - Central termosolar de acumulación por sales de La Africana Energía, en Córdoba, España. FUENTE: <http://www.africanaenergia.es/>

1.3. Historia de la Energía Nuclear

La historia de la energía nuclear se remonta a la antigua Grecia, hace miles de años. Siendo Demócrito de Abdera el primer filósofo en proponer un significado para átomo: “*parte más pequeña e indivisible de la materia*”. A partir de ahí pasaron muchos años hasta que se pudiera avanzar en los términos suficientes, siendo hasta varios siglos después, en los albores del siglo XVII, y gracias al postulado del químico John Dalton que dijo que los átomos que componen un mismo material son iguales, se comenzó a investigar acerca de identificar y clasificar los elementos, formando varios años después la tabla periódica que a día de hoy conocemos¹.



Figura 7 - Átomo como forma más pequeña de la materia, indivisible. FUENTE: http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad2/modelos_atomicos/modelo_dalton



Varios años después, diversos científicos tales como Henri Becquerel o Marie Curie, estudiando los diversos elementos que emitían los diferentes tipos de radiación, descubren la radiactividad. Dicho descubrimiento, unido al de otros brillantes científicos como J. J. Thompson o Ernest Rutherford⁵, cambiaron la forma de ver los átomos, pasando a ser elementos divisibles, conformados por otros elementos aún más pequeños: los electrones y el núcleo atómico.

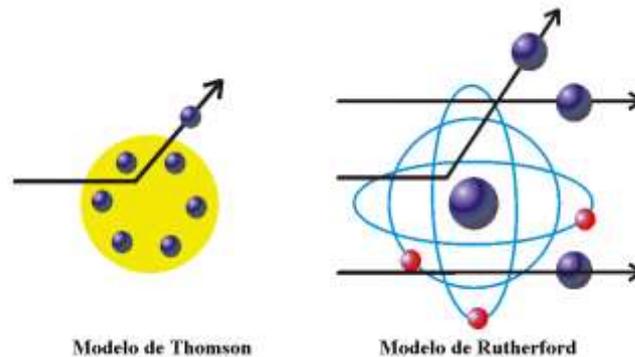


Figura 8 - Diferentes modelos atómicos. FUENTE: <http://www.eis.uva.es/~qgintro/atom/tutorial-04.html>

Pronto vendrían una saga de descubrimientos y teorías científicas que cambiarían la percepción de la naturaleza. Desde el modelo atómico de Niels Böhr, que hizo comprender que los electrones estaban distribuidos en diferentes capas según su nivel energético, pasando por el descubrimiento del neutrón por James Chadwick hicieron posible la percepción del átomo en su totalidad, siendo así subdividido en las partículas subatómicas que componían el núcleo, los protones y los neutrones, y las partículas subatómicas que orbitaban al núcleo en diferentes niveles energéticos, los electrones.

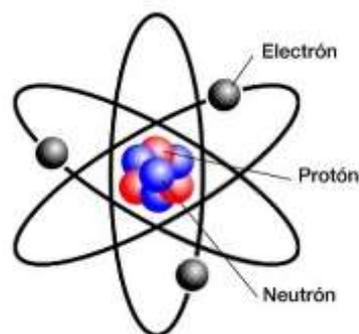


Figura 9 - Modelo atómico. FUENTE: <https://www.youtube.com/watch?v=zF-MX-VxnGE>

⁵ Tabla periódica sin tener en cuenta los elementos artificiales o de tiempo de vida limitado, añadidos estos a posteriori.



Una vez realizados tales descubrimientos, se vio la posibilidad de, gracias a los descubrimientos de Frédéric Joliot e Irene Curie de la radioactividad artificial y de la fórmula desarrollada por el brillante físico Albert Einstein⁶, que correlacionaba la masa con la energía, se vio la posibilidad de generar energía mediante el bombardeo de neutrones en determinados elementos. Uno de los grandes pioneros en este campo fue Enrico Fermi, bombardeando en núcleo de hasta 60 elementos, entre ellos el isótopo fisil del Uranio, el U-235. Y como muchos descubrimientos en esta vida, muchos de los avances en este campo se deben a la aplicación militar⁷ que ello proporcionó.

1.3.1. La energía de Fisión Nuclear

En física nuclear se entiende como fisión nuclear a aquella reacción en un núcleo de un elemento pesado, que hace que se divida en dos o más partes. Ésta reacción hace que el núcleo del elemento pesado pase a separarse en núcleos de tamaño inferior, dando así lugar a la liberación de diferentes radiaciones. Las radiaciones liberadas, de menor a mayor cantidad de energía son la radiación α (núcleos de Helio), radiación β (electrones y positrones) y radiación γ (fotones).

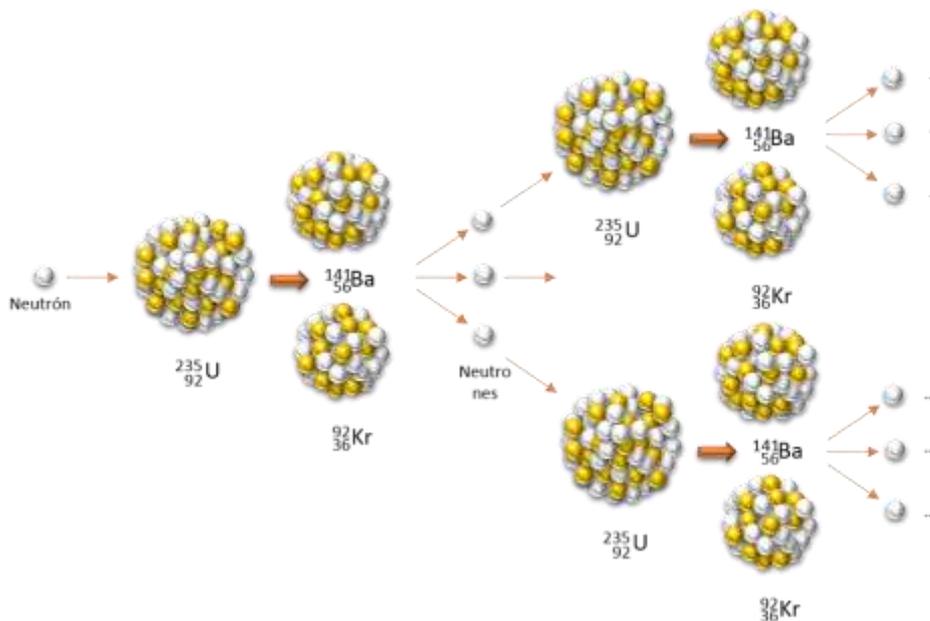


Figura 10 - Fisión de Uranio-235 y productos. FUENTE: <http://www.quimicas.net/2015/08/la-fision-nuclear.html>

⁶ $E = mc^2$. En esta fórmula E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz.

⁷ Gran parte del avance nuclear se lo debemos al Proyecto Manhattan, un proyecto militar surgido en los albores de la WWII, impulsado por el presidente estadounidense Roosevelt con el primer consejo en 1939 de Albert Einstein, con el fin de crear un arma de destrucción masiva alimentada por la fisión nuclear de los núcleos de uranio-235 y plutonio-239. Todo ello concluyó con la demostración de parte de los Estados Unidos de América de su poder destructivo en las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki.



La reacción de fisión desprende a su vez energía debido al defecto másico que ésta genera. Esta cantidad de energía liberada es capaz de calcularse gracias a la fórmula de Albert Einstein $E = mc^2$, siendo E la energía liberada, m el defecto másico que se produce entre la masa del núcleo sin reaccionar y la masa total de los productos resultantes y c la velocidad de la luz. Analizando esta ecuación se desprende que, para un defecto másico muy pequeño, la cantidad de energía liberada es enorme, dado que la velocidad de la luz es una cantidad muy grande y además está elevada al cuadrado en la ecuación. Ahí es donde radica la virtud de la fisión nuclear. Esta energía se manifiesta físicamente en forma de energía cinética de los productos, que a su vez generan calor al ser frenados por diferentes medios materiales. Se trata por tanto de reacciones altamente exotérmicas. Si se quiere aprovechar la mayor cantidad de energía liberada por dichas reacciones, será necesario un medio capaz de absorber la mayor cantidad de calor posible, para así poder utilizarlo.

La energía emitida en las reacciones de fisión nuclear viene dada en forma de energía cinética de los fragmentos producto de la fisión, como en forma de fotones, principalmente rayos gamma, que al contar con una masa nula, son toda energía⁸. Por lo tanto, dado que los fotones interactúan muy levemente con la materia, la energía que se recoge será debido al intercambio de energía cinética entre las partículas α y β . Antes se dijo que para que la fisión nuclear se llevara a cabo, los núcleos a fisionar debían de ser de elementos pesados, pero también preferiblemente de elementos fisionables⁹, a su vez será necesaria una masa crítica¹⁰ del elemento en cuestión.

Una vez conocidos tales datos, todos ellos gracias a cientos de horas de investigación tanto académica como militar, se ve la oportunidad de producir energía eléctrica en base a la fisión nuclear. El principio es el mismo que el de una central térmica convencional, solo que esta vez el combustible que generará el calor será nuclear, por lo que se deberán de tomar las medidas oportunas para garantizar la seguridad y estabilidad de la central.

Para ello, se eligieron varios combustibles nucleares, entre los que destaca el Uranio-235¹¹. El uranio es encontrado en la naturaleza en forma óxido, conocido normalmente como pechblenda. El uranio que se da en la naturaleza es el Uranio-238, teniendo que pasar por un proceso de enriquecimiento del mineral para generar U-235.

⁸ La energía de una partícula relativista viene dada por $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$.

⁹ Un elemento es fisionable o fisible cuando es capaz de fisionar debido a neutrones de cualquier naturaleza energética.

¹⁰ Masa mínima de un elemento fisionable para que sea capaz de mantener una reacción en cadena por sí mismo.

¹¹ El Uranio-235 es un isótopo del Uranio, que apenas se genera en la naturaleza y es aquel isótopo fisionable del Uranio. Normalmente el combustible nuclear está enriquecido al 3% de Uranio-235.

Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.



Figura 11 - Proceso de enriquecimiento del Uranio. FUENTE: <http://www.qirabsas.com/nota/4373/>

Una vez obtenido el combustible nuclear deseado, se procede a introducir en el reactor. Hay varios tipos de reactores y cada uno funciona de una forma diferente, teniendo algunos diferentes tipos o modalidades de agentes moderadores¹². En fisión nuclear los reactores nucleares más comunes a día de hoy son los BWR y PWR.

Los reactores BWR son reactores de agua en ebullición, de agua ligera, y diseñados en un principio por General Electric. En estos reactores, el agua circula libremente por entre el reactor y bulle en él, yendo después a una turbina de vapor para generar electricidad. Una vez turbinada, el agua, ahora en estado líquido gracias a un intercambiador de calor para refrigerar, cierra el circuito volviendo al reactor.

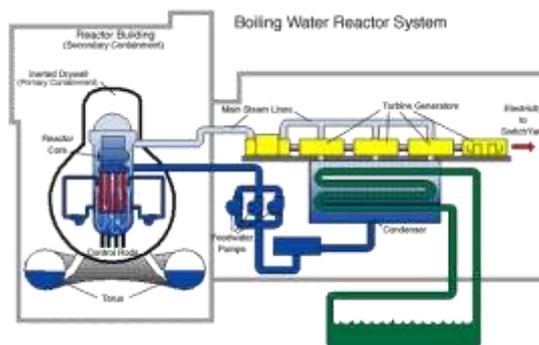


Figura 12 - Esquema de un reactor BWR. FUENTE: <http://www.nucleartourist.com/type/bwr.htm>

¹² Un agente moderador es un elemento introducido en el interior del reactor con el fin de disminuir la velocidad de los neutrones en el reactor y que la reacción sea así lo más eficaz posible. Agentes moderadores pueden ser las barras de control o el agua pesada, entre otros.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

El otro tipo usual de reactor es el PWR. Este reactor es un reactor de agua a presión, el cual, a diferencia del primero, tiene dos circuitos claramente diferenciados. El primero es el del agua que circula por el reactor y captura el calor, pasando después por un intercambiador de calor para ceder calor al circuito de generación. Durante este proceso el agua del circuito primario siempre está en estado líquido debido a la presión, de ahí su nombre. En el circuito de generación, alimentamos la turbina con el vapor agua que sale del intercambiador de calor, para después refrigerarla y recomenzar el ciclo.

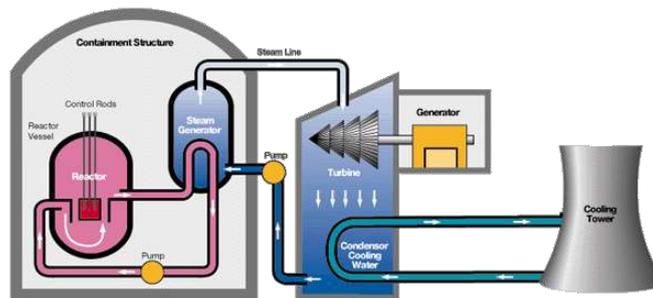


Figura 13 - Esquema de un reactor PWR. FUENTE: <http://www.nucleartourist.com/type/pwr.htm>

• **1.3.2. La energía de las Estrellas: la Fusión Nuclear**

En física nuclear se entiende como reacción de fusión nuclear a aquella reacción en la que dos núcleos ligeros se unen para formar uno más pesado. Dichos núcleos ligeros suelen ser el hidrógeno y sus isótopos¹³. Por norma general, la fusión de dos núcleos ligeros va acompañada de la emisión de una alta cantidad de energía, en forma de energía cinética de los productos de la reacción de fusión nuclear. Para que se produzcan estas reacciones de fusión, los reactivos han de estar en estado de plasma¹⁴, ya que las temperaturas necesarias para producir este tipo de reacciones son del orden de cientos de millones de grados.

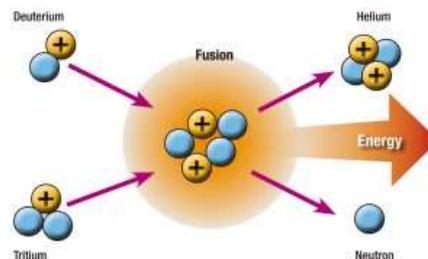


Figura 14 - Fusión nuclear del Deuterio y del Tritio. FUENTE: <http://quimica01robincueva.blogspot.com.es/>

¹³ Los isótopos del hidrógeno son el Deuterio, con 1 neutrón en su núcleo y el Tritio con 2 neutrones en su núcleo. Ambos son los elementos idóneos para realizar la fusión nuclear.

¹⁴ El estado plasma es también llamado el cuarto estado de la materia, similar a un fluido gaseoso, pero estando sus partículas parcial o totalmente ionizadas.



La fusión nuclear es un proceso muy común en la naturaleza ya que es el proceso que se da en las estrellas, y éstas conforman un porcentaje muy elevado de la masa conocida del universo. Sin embargo, las condiciones de temperatura a las que se da este proceso de fusión son tan elevadas que el ser humano necesita ejercer unas determinadas condiciones artificiales para que la fusión pueda llevarse a cabo con éxito en la Tierra.

En primer lugar, se ha de definir qué tipos de confinamiento existen y cuáles son los más apropiados para realizar la fusión nuclear artificialmente:

- Confinamiento gravitatorio: el confinamiento gravitatorio es aquel que se da en la naturaleza en las estrellas debido al fuerte campo gravitatorio de éstas. Dicho confinamiento es imposible de crear en la Tierra por motivos obvios, por lo cual es desechado como fuente para generar energía.

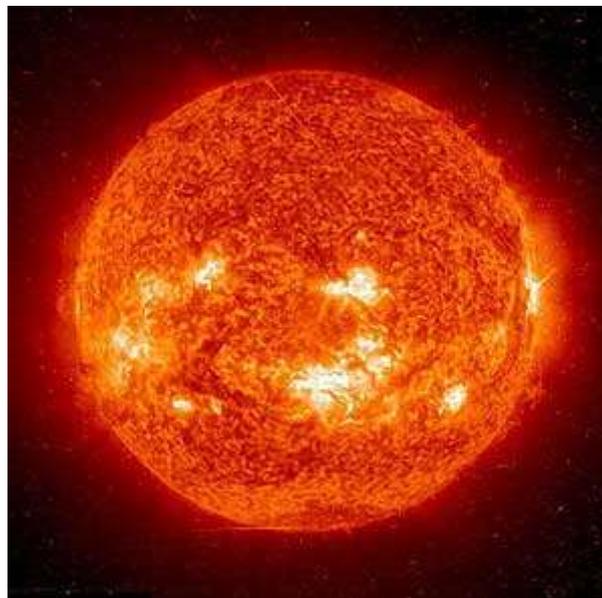


Figura 15 - Reactor nuclear de fusión nuclear por confinamiento gravitatorio (estrella Sol). FUENTE:
<http://www.elmundo.es/elmundo/2007/10/04/ciencia/1191487480.html>

- Confinamiento magnético: el confinamiento magnético es un confinamiento en el que se trata de encerrar un plasma¹⁵ calentado a cientos de millones de grados mediante campos magnéticos. Debido a que el plasma está a unas temperaturas tremendamente grandes, no hay material capaz de soportar tales condiciones, por lo que se decidió, mediante la realización previa de un vacío cuasi perfecto, el confinamiento del plasma mediante una trampa magnética. A su vez, existen diferentes tipos de confinamientos magnéticos, generalmente debido a diversos usos de los campos magnéticos.

¹⁵ El plasma destinado a realizar la fusión nuclear mediante confinamiento magnético es un plasma compuesto de Deuterio y Tritio.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

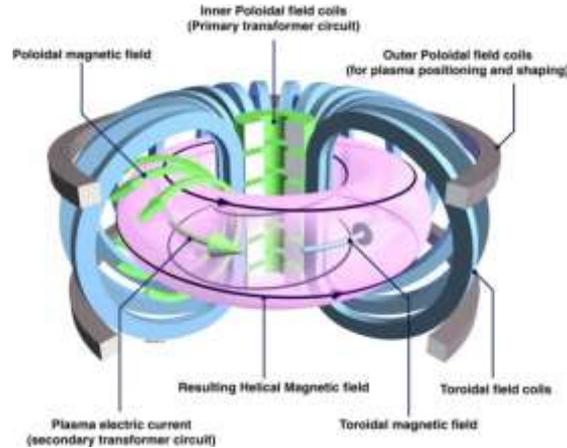


Figura 16 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento magnético. FUENTE
<http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm>

Dentro del confinamiento magnético existen además dos tipos reactores básicos para su generación, siendo éstos:

- El Tokamak, acrónimo ruso para cámara toroidal con bobinas magnéticas, siendo un reactor tiene como objetivo la fusión nuclear en plasma. Tiene forma de cámara toroidal, siendo hueco, rodeado por fuera por bobinas que hacen posible la trampa magnética. Dentro de este reactor su campo magnético toroidal está compuesto por: un solenoide central, siendo un superconductor que induce la corriente al plasma; una bobina toroidal, siendo superconductora y estabilizadora del plasma; una bobina poloidal, siendo superconductora y posicionando el plasma en el toroide; una cámara de vacío para que el plasma no esté en contacto con nada y unos trafos para abastecer a las bobinas.
- El Stellarator es un reactor de fusión toroidal de campo magnético poloidal producido por bobinas exteriores, siendo de funcionamiento continuo al no existir corriente plasmática inductiva. Existen a su vez 3 tipos:
 - Torsatrones: con bobinas helicoidales continuas.
 - Modulares: de bobinas no planas.
 - Helíacos: con un conjunto de bobinas circulares distribuidas en una hélice enrollada en la bobina circular central.

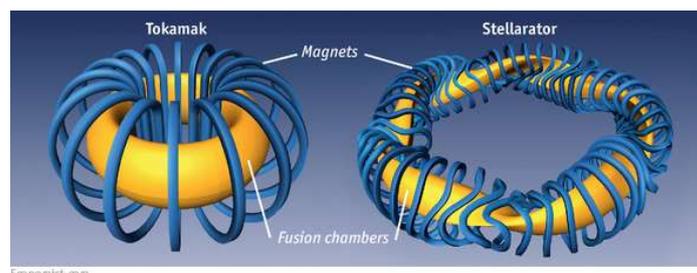


Figura 17- Reactores tipo Tokamak y Stellarator. FUENTE: <http://www.economist.com/news/science-and-technology/21676752-research-fusion-has-gone-down-blind-alley-means-escape-may-now-be>



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

- Confinamiento inercial: el confinamiento inercial no es propiamente un confinamiento al uso, debido a que no está toda la materia confinada, sino que se le dota por lo general de una energía cinética suficiente a una zona de la materia para que ésta sea capaz de fusionarse. Por norma general, éste tipo de confinamiento es realizado mediante pares coincidentes de haces láser de alta potencia, por lo que se dispara los pares simultáneamente, comprimiendo la materia y provocando una reacción de fusión nuclear.

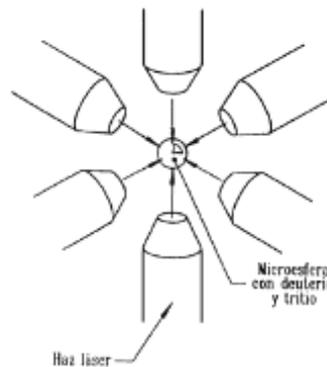


Figura 18 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE:
http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_3/ciencia3/135/htm/sec_5.htm

La fusión nuclear a su vez es una forma de generar energía sumamente limpia. Ciertamente también genera residuos nucleares debido a la activación de las paredes del reactor debido al desconfinamiento que sufren los neutrones presentes en la reacción, pero nada comparado con los residuos o impactos que generan las energías convencionales (por ejemplo, la energía producida en centrales convencionales de fisión).

A su vez presenta la ventaja de que el combustible nuclear para la realización del plasma se puede obtener fácilmente en la naturaleza, puesto que son isótopos del Hidrógeno, y éstos son los componentes básicos del agua, que es muy abundante en la Tierra. Sin embargo, en el universo, el hidrógeno es el elemento químico más abundante, superando el 90% de los átomos de materia conocidos. A su vez, los isótopos del hidrógeno presentan otro tipo de abundancias, presentando el deuterio una abundancia del 0,0184 % en fracción atómica en la Tierra y el Tritio es extremadamente raro en la naturaleza dado que se produce en la Tierra por la interacción de los rayos cósmicos con los gases atmosféricos. Entonces, para la obtención del tritio se debería realizar indirectamente mediante una reacción nuclear en la que interviene el litio, siendo además el tritio un elemento radiactivo de periodo de semidesintegración de 12,33 años.

Al igual que la fisión nuclear, no hemos de olvidarnos que la fusión nuclear también está en sintonía con la industria militar, siendo el más claro ejemplo las bombas termonucleares de fusión o más comúnmente conocida como Bombas de Hidrógeno o Bombas H. También es lógico decir que ha sido en parte gracias a todos los avances en tecnología armamentística los que nos han permitido tener una mayor comprensión acerca de todos estos fenómenos.



Por último, como anécdota, durante la Guerra Fría se barajó por diversos científicos de ambos bandos la generación de energía mediante la fusión fría. La fusión fría es un supuesto de fusión termonuclear en las que las condiciones de presión y temperatura son las cercanas a las del ambiente, llevándose a cabo con un instrumental de bajo coste, siendo algo sumamente irreal, puesto que las condiciones que se conocen para que se dé la fusión termonuclear son muchos órdenes de magnitud mayores.

Con ese tipo de fusión fría se pretendía generar energía cuasi ilimitada a un bajo coste, siendo además producto de la constante lucha tecnológico-armamentística entre EEUU y la URSS. Los elementos usados en la fusión fría eran isótopos de deuterio fusionados en átomos de helio.

Los precursores de ésta teoría fueron los electroquímicos Martin Fleischmann y Stanley Pons. Dicha teoría, habiendo carecido de solidez científica, es considerada a día de hoy un bulo.

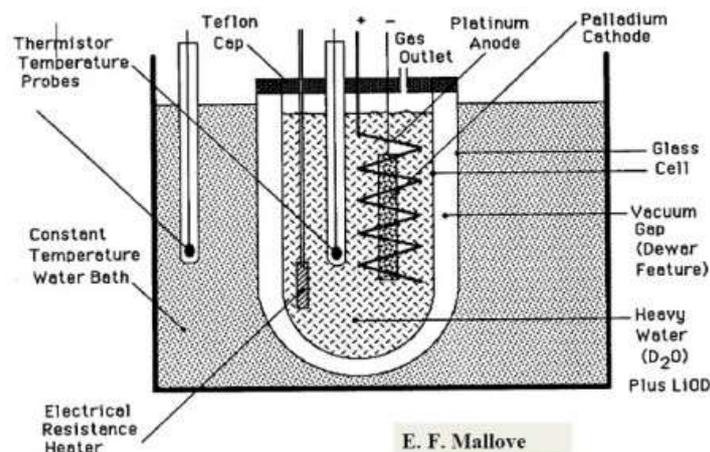


Figura 19 - Ejemplo de reactor de fusión fría. FUENTE: <http://naukas.com/2012/11/07/aunque-la-lenr-se-vista-de-seda-fusion-fria-se-queda/>

Finalmente, como parte del objeto del presente estudio va a versar sobre la fusión nuclear, será descrita con mucho más detalle a posteriori.

1.4. Concepción de la Energía Nuclear en la Sociedad Española

Actualmente, la energía nuclear se encuentra en una encrucijada a nivel mundial con respecto a la opinión popular. La energía nuclear está conceptuada erróneamente en la sociedad debido a la desinformación vertida durante largos años acerca de ella. También existe mucha controversia debido a diversos sucesos acaecidos en el tiempo.



En España la generación eléctrica en base a la energía nuclear es del 21,3%¹⁶. Es decir, algo más de una quinta parte de la energía en España es de procedencia nuclear, entonces, ¿a qué es debida esa fuerte oposición a la energía nuclear?



Figura 20 - Manifestación en contra de las centrales nucleares. FUENTE:

<http://www.terra.org/categorias/articulos/sin-nucleares-tendremos-un-mundo-mas-sano-mas-limpio-y-mas-seguro>

Cabe decir que desde que se desarrolló el Proyecto Manhattan, se pudo observar la capacidad destructiva que es capaz de generar la energía nuclear. Es por ese tipo de cosas que la sociedad teme a la energía nuclear, por su capacidad invisible de destrucción. Si bien es extremadamente inusual que ocurran accidentes de características nucleares, son los que más llaman la atención.

En cuanto a los accidentes, que se asocian rápidamente con la energía nuclear, cabe destacar dos de los mayores en la historia. El primero es el accidente nuclear de Chernóbil, en la central nuclear Vladímir Ilich Lenin, en las cercanías de Prypiat en la actual Ucrania, aunque ocurrió bajo el gobierno de la URSS. Dicho accidente, sin entrar en detalles, se ocasionó debido a un simulacro de corte de suministro eléctrico que derivó en un sobrecalentamiento del reactor 4. Esto ocasionó la pérdida de millares de vidas, unas debidas a su heroica entrega, los Liquidadores, y otros debido al infortunio de estar en las cercanías cuando sucedió.

El otro gran accidente, mucho más cercano en el tiempo, es el accidente ocurrido en Japón, más concretamente en la central nuclear de Fukushima. Dicho accidente no ocurrió debido a un fallo humano como pudo ser el accidente de Chernóbil, sino que fue una concatenación de sucesos lo que lo produjo. Ocurrió debido a un terremoto seguido de un tsunami. El terremoto fue de magnitud 9 en la escala Richter, cuando la central había sido

¹⁶ Datos netos obtenidos de fuentes del Gobierno de España del año fiscal 2013.



diseñada para soportar terremotos de magnitud 8¹⁷. Pero el terremoto no fue el problema ya que la central aguantó el envite perfectamente, sino que el problema vino cuando el tsunami arrasó con los sistemas externos de refrigeración, provocando el sobrecalentamiento de varios reactores.



Figura 21 - Central nuclear de Fukushima en llamas. FUENTE:

<https://redfilosoficadeluruquay.wordpress.com/2015/12/19/la-pesadilla-de-fukushima-no-ha-terminado/>

Estos accidentes han calado hondo en la sociedad, atemorizándola en cuanto a la percepción de la seguridad de la energía nuclear se entiende. Si bien la plena seguridad no existe, puesto que es inviable, cabe decir que las centrales nucleares son de las centrales más seguras y que menos impacto ambiental tienen. El mayor problema reside en la gestión y el almacenamiento de los residuos de alta actividad¹⁸. Para ello, dado que en España no se cuenta con reprocesadoras¹⁹, se propuso realizar un Almacén Temporal Centralizado o ATC. Pero también hubo manifestaciones en contra, debido al miedo que la energía nuclear ocasiona.

Viendo el miedo y la desinformación que tiene la sociedad española respecto a la energía nuclear, el verdadero problema reside en aquellos que utilizan dicha desinformación en su beneficio. Está claro que la energía nuclear por fisión es una energía caduca, pues no hay reservas infinitas de uranio, aunque son mucho más seguras, a la vez que menos

¹⁷ Al diseñarse para un terremoto de magnitud 8 y recibir el impacto de uno de magnitud 9 y aun así aguantar la central, hace ver su seguridad, puesto que uno de magnitud 9 libera aproximadamente 25 veces más energía que uno de magnitud 8.

¹⁸ Los residuos de alta actividad son el combustible nuclear gastado que no sirve para la producción de energía pero que aún continuarán liberando energía debido a fisión espontánea durante miles de años.

¹⁹ Las reprocesadoras son industrias que reprocesan el combustible nuclear gastado: Lo procesan de nuevo para enriquecerlo y que sirva de nuevamente como combustible nuclear.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

contaminantes, que una central térmica convencional: *“las cenizas emitidas por una central térmica deposita en el medioambiente que la rodea 100 veces más radiación que una central nuclear de la misma potencia”*²⁰, aunque todo ello hace que la apuesta más viable sea la de la fusión nuclear.

La cuestión entonces recae sobre la opinión que tiene la sociedad sobre la fusión nuclear. Haciendo esa pregunta obtenemos como respuesta que la sociedad no sabe bien de qué se trata y se asocia directamente con la fisión nuclear y sus perjuicios, *“El sol es el único reactor de fusión nuclear que realmente necesitamos”*²¹.

A continuación, serán expuestos varios pros y contras de la energía nuclear.

LA ENERGÍA NUCLEAR A DEBATE: ARGUMENTOS	
A favor	En contra
Las energías renovables no producen por ahora toda la electricidad necesaria	Apenas incide favorablemente en el cambio climático porque la principal fuente de emisiones es el transporte por carretera
Países como Francia, Finlandia o Estados Unidos apuestan por esta alternativa	Estados Unidos, Francia, Japón, Alemania, Rusia y Corea del Sur (75% de energía nuclear en el mundo) tienen una persistente oposición popular
Asegura el suministro eléctrico en España al funcionar los 9 reactores las 24 horas del día los 365 días al año	En los anteriores países, por ejemplo, para mantener constante el número de reactores operativos deberían construirse 80 nuevos reactores en los próximos diez años
Es una energía limpia, al evitar la emisión de 60 millones de toneladas de CO2 al año	Incluso con 1.000 ó 1.500 centrales en los próximos 50 años, la cobertura eléctrica mundial no llegaría al 20% y la reducción de emisiones de CO2 no alcanzaría el 10%
Es económica, porque produce el kWh con unos costes razonables	No es competitiva. Si se quisiera producir toda la energía eléctrica mundial por medios nucleares, habría que construir 2 centrales cada semana durante 50 años. Y sus elevados costes de capital suponen el 75% del coste total del kWh nuclear
Seguridad garantizada	Evidentes problemas de seguridad incrementados ahora con el terrorismo internacional. Además de los problemas que generan los residuos y la proliferación de energía nuclear que obligaría a recurrir al plutonio como combustible

Figura 22 - Pros y contras de la energía nuclear mediante fisión. FUENTE: <http://www.forumlibertas.com>

²⁰ Fragmento de un artículo de la revista Scientific American.

²¹ Título de un documento de Greenpeace España en contra de la generación mediante fusión nuclear.



2. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO



El presente estudio trata de analizar desde el punto de vista económico la futura viabilidad de la fusión nuclear como fuente de energía de manera que quede presente que es una apuesta segura para un modelo energético limpio y seguro.

Para ello en un principio se realizará una descripción teórica de:

- La fusión nuclear.
- Los diferentes tipos de tecnologías para lograrla artificialmente.
- La evolución tecnológica que ha sufrido la fusión nuclear y la que está por venir.
- El futuro de la fusión nuclear y la perspectiva de futuro que de esta forma de energía.

También se realizará un análisis económico de la viabilidad de un reactor de fusión nuclear, viendo su desarrollo y si es o no conveniente su estudio y evolución para su correcta realización.

Para todo ello, además se realizará un análisis científico, basado en la lectura de algunos artículos científicos que puedan tener relación con el presente estudio, a fin de clarificar las diferentes posturas de la comunidad internacional.

Como último punto, se tratará de relacionar todo lo expuesto en el presente estudio con el fin de demostrar que, además de la viabilidad técnica de la fusión nuclear, su viabilidad económica puede ser positiva, con el fin de ser la sustituta ideal para un gran número de fuentes de energía. Así, se realizará una comparación con una de ellas para demostrar el beneficio de ésta energía.



3. ESTADO DEL ARTE



3.1. Análisis teórico

La fusión nuclear es el proceso por el cual dos núcleos ligeros se unen, formando un núcleo más pesado. Esta reacción, por norma general, es llevada a cabo en un estado plasmático de la materia y tiene la capacidad de liberar una cantidad elevada de energía debido a que parte de la materia de la reacción se transforma en energía en base a la ecuación de Albert Einstein:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

Según esa ecuación, la masa que se ha perdido en la reacción de fusión nuclear se ha convertido en energía, pues así las correlaciona.

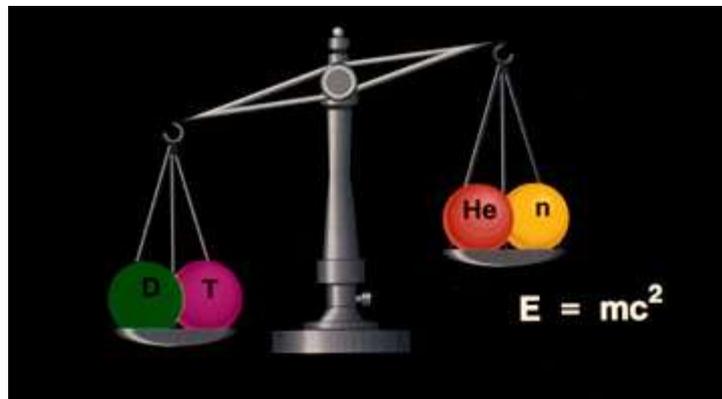
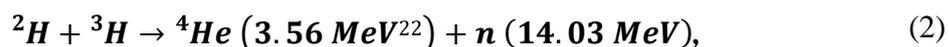


Figura 23 - Balance de masas entre reactivos y productos de la reacción de fusión nuclear, ese defecto másico entre ambos es el que se convierte en energía. FUENTE: <http://fusionpower.org/InformationFusion.html>

El límite para la liberación de energía gracias a la fusión nuclear la establece el hierro (Fe), siendo la fusión de todos los núcleos atómicos de energía parecida por debajo del hierro liberadores de energía y siendo todos los núcleos atómicos, desde el hierro en adelante, núcleos los cuales necesitan absorber energía para que se produzca la fusión nuclear.

Pero, aunque es posible la fusión nuclear de muchos elementos, la más usual es la fusión nuclear del hidrógeno (H), en particular de sus isótopos: el deuterio (D) y el tritio (T). Por norma general, estos elementos (los más ligeros), son los más abundantes en el universo. Las reacciones que se llevan a cabo en la fusión nuclear del hidrógeno y sus isótopos son:

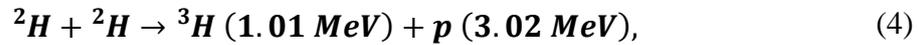


siendo ${}^2\text{H}$ un núcleo de deuterio, ${}^3\text{H}$ un núcleo de tritio, ${}^4\text{He}$ un núcleo de Helio-4 y n un neutrón.

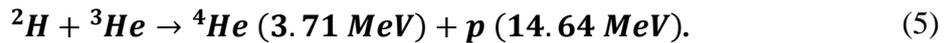
²² El MeV es una unidad de energía, que equivale a 10^6 eV (electronvoltio) siendo este último a la energía potencial que experimenta un electrón al moverse desde un potencial V_A hasta un potencial V_B siendo la diferencia de potencial $V_A - V_B = 1V$. Equivale a $1,60217656 \cdot 10^{-19}$ Julios.



siendo ahora ${}^3\text{He}$ un núcleo de Helio-3.



donde p es un protón.



Siendo a su vez el ciclo del tritio el siguiente:



donde ${}^6\text{Li}$ es un núcleo de Litio-6.

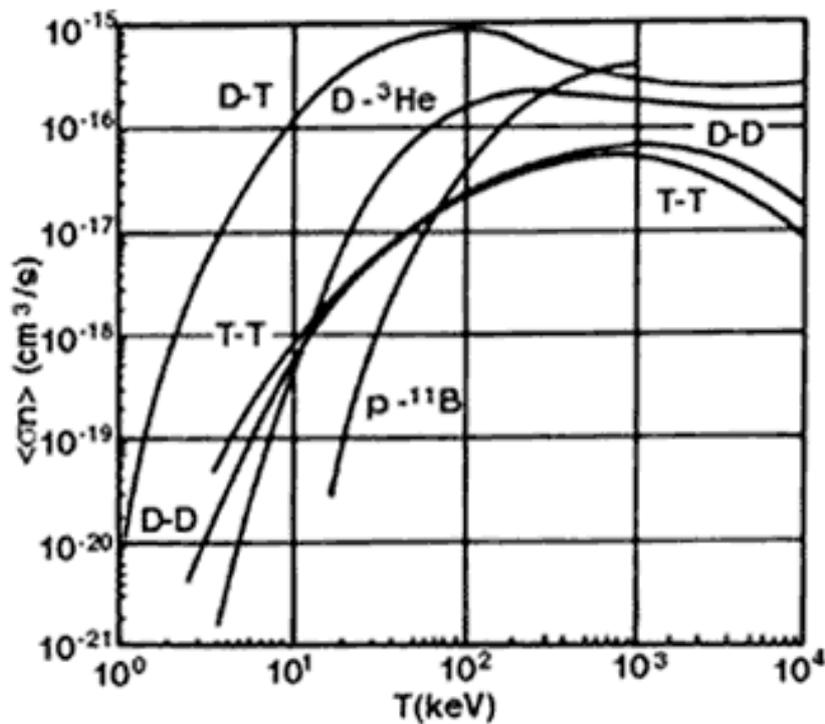


Figura 24 - Sección eficaz de fusión en función de la energía de isótopos del hidrógeno. FUENTE:
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/sec_5.htm

A su vez, se puede ver que la reacción que más energía puede aportar es aquella en la que los núcleos que se fusionan son un núcleo de deuterio y otro de tritio. Para hacerse una idea de cuál es la magnitud de energía liberada por esta reacción, se calcula que se necesitarían alrededor de unos 25 gramos de deuterio y tritio para cubrir la demanda energética de una persona para toda su vida, por lo tanto, la energía liberada por tan solo 600 kg de deuterio equivaldría a 1,3 millones de toneladas de petróleo.

Por contrapartida, se ha de tener en cuenta que para que se produzcan reacciones de fusión nuclear se ha de superar la barrera energética producida por las fuerzas de repulsión



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

electrostática entre los núcleos cargados positivamente. Cabe mencionar a su vez que, cuando un nucleón (ya sea un protón o un neutrón) se añade a otro núcleo, la fuerza nuclear atrae a otros nucleones, pero debido a que el influjo de esta fuerza es de corto alcance, atrae sólo a los inmediatamente próximos.

Generalmente, la energía de enlace por nucleón aumenta conforme aumenta el tamaño del núcleo hasta el hierro, siendo éste núcleo el más estable, para después disminuir nuevamente con el tamaño del núcleo. Finalmente, la energía de enlace por nucleón se vuelve negativa y los núcleos más pesados, correspondientes a más de 208 nucleones, se vuelven inestables.

Una excepción a todo esto, y parte de la explicación de por qué se usa el deuterio y el tritio para generar helio, es que la energía promedio de enlace del helio es mayor que la del litio (el siguiente elemento de la tabla periódica). La explicación de ello la proporciona una parte del principio de exclusión de Pauli²³, donde se establece que, debido a que los protones y los neutrones son fermiones²⁴, no pueden existir dos de ellos en el mismo estado cuántico, concluyendo esto que, al estar sus dos protones y sus dos neutrones en estado fundamental, la energía de enlace por nucleón es tremendamente grande y por tanto es un núcleo muy estable.

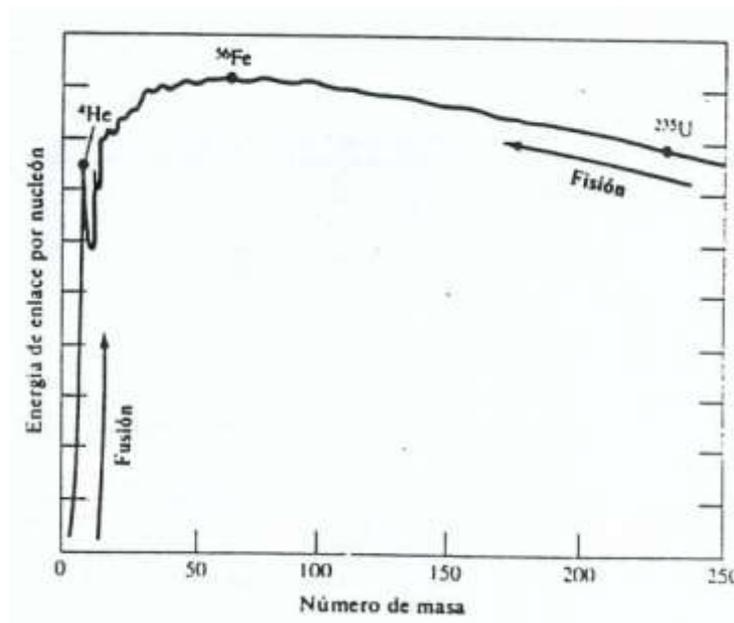


Figura 25 - Energía de enlace por nucleón. FUENTE: <https://sites.google.com/site/fisica2palacios/fisica-moderna/fisica-nuclear>

²³ El principio de exclusión de Pauli, enunciado por Wolfgang Ernst Pauli, es un principio de la mecánica cuántica el cual dice que no puede haber dos fermiones con el mismo estado cuántico, es decir, dos fermiones no pueden compartir todos sus números cuánticos, siempre dentro del mismo sistema cuántico.

²⁴ Un fermión es uno de los dos tipos de partículas básicas que existen en la naturaleza, siendo el otro tipo el bosón. Son caracterizados por tener un espín semi-entero. Según el modelo estándar, hay dos tipos de fermiones: los quarks y los leptones. Se consideran los constituyentes básicos de la materia interactuando entre sí gracias a un tipo en particular de bosones. Se les llama fermiones en honor a Enrico Fermi.



· 3.1.1. La fusión nuclear en la naturaleza

Una vez visto el fundamento de la fusión nuclear, se ha de ver en qué condiciones se da en la naturaleza. Y es que la fusión nuclear es mucho más común de lo que se piensa, porque es gracias a ella por la que la Tierra alberga vida. Ello es debido a que la fusión nuclear se da en la naturaleza en todas las estrellas del universo y el Sol es una estrella.

Se ha de describir pues qué es una estrella, dado que es el lugar natural donde se realiza la fusión nuclear a gran escala. Una estrella es una bola incandescente de plasma la cual obtiene su forma debido a la gravedad y a un equilibrio de sus fuerzas hidrostáticas, es decir, cuando la gravedad trata de aglutinar el plasma, la presión de éste hace que tienda a expandirse hacia afuera. Dicha presión, a su vez, depende de la temperatura, manteniéndose ésta lo más constante posible debido a la energía que emite la estrella.

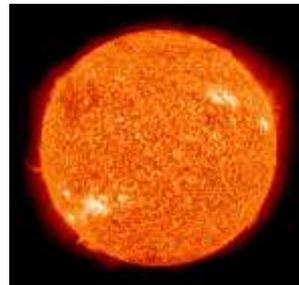


Figura 26 - Estrella Sol, centro del sistema solar. FUENTE: NASA

Una estrella emite luz y calor debido a las continuas reacciones de fusión nuclear que se están produciendo en ella. A su vez, la medida estándar para medir la masa de las estrellas es la masa solar, siendo ésta la masa que posee el Sol. La masa del Sol es de, muy aproximadamente, 2×10^{30} kg. Se puede decir entonces que las masas de las estrellas pueden estar comprendidas entre 0.08 y 200 M_{sol} , siendo los objetos estelares de hidrógeno de masa menor al límite inferior de ese rango llamadas enanas marrones²⁵.

Aun teniendo en cuenta las enormes temperaturas y la gravedad que se da en una estrella, resulta que la temperatura alcanzada en una estrella sería insuficiente para que se fusionen los iones desde una perspectiva clásica. Pero la realidad dice lo contrario. Esto es debido a que entran en juego fenómenos cuánticos como el efecto túnel, haciendo que dos partículas que presenten energías insuficientes para la fusión nuclear desde una perspectiva clásica, tengan una probabilidad no nula de traspasar la barrera de potencial que separa a ambas. Por otro lado, al haber un número tan elevado de posibles colisiones, se dan las reacciones de fusión estadísticamente necesarias como para que la estrella se sostenga, pero no tantas como para que le estrella llegue a explotar.

²⁵ Las enanas marrones son cuerpos subestelares compuestos de hidrógeno fundamentalmente, siendo insuficientemente masivos como para que las reacciones de fusión nuclear se mantengan en el tiempo.



Para clarificar todo ello, se ha de explicar en qué consiste el efecto túnel:

- El efecto túnel es un fenómeno dentro de la mecánica cuántica por el cual una partícula viola los principios de la mecánica clásica y penetra una barrera potencial mayor a la energía cinética que porta dicha partícula.

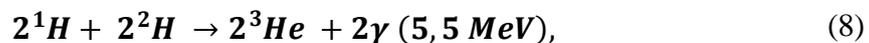


Figura 27 - Ejemplo de efecto túnel cuántico. FUENTE: <http://triplenlace.com/2013/07/07/el-efecto-tunel-explica-que-se-den-en-el-espacio-reacciones-quimicas-que-no-se-producen-en-condiciones-normales/>

Lo usual en una estrella es que se inicie su combustión nuclear al entorno del 75% de hidrógeno y 25% de helio, admitiendo también muy pequeñas cantidades de otros elementos. Poniendo como ejemplo la estrella de nuestro sistema solar, el Sol, tenemos que las reacciones que se producen en ella, según la cadena protón-protón, son:



donde ^1H es un protón, ^2H es un núcleo de deuterio, e^+ es un positrón y ν_e es un antineutrino electrónico.

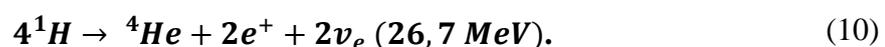


donde ^3He es un núcleo de Helio-3 y γ es radiación gamma.



donde ^4He es un núcleo de Helio-4.

Simplificando a su vez estas reacciones, queda:



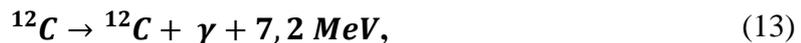
Esto es válido para estrellas que posean un núcleo cuya temperatura sea del orden de 10^7 K. Para estrellas cuyo núcleo tenga temperaturas del orden de 10^8 K y oscilen entre $0,8$ y $10 M_{\text{sol}}$, la reacción será:



donde ${}^8\text{Be}$ es un núcleo de Berilio-8.



donde ${}^{12}\text{C}$ es un núcleo de Carbono-12.



donde γ es radiación gamma.

La reacción global simplificada es la siguiente:



Además, se puede decir que la composición global de una estrella varía en función de la generación a la que pertenezca. Al inicio de una vida de una estrella de tamaño equiparable a la del Sol, la composición sería del entorno al 75% de hidrógeno, 23% de helio y el 2% restante lo forman elementos muchos más pesados aportados por estrellas muertas antes del nacimiento del Sol.

Queda, por último, hablar de la extinción de las estrellas. Esto se debe al agotamiento del combustible nuclear ligero (hidrógeno e isótopos y helio) debido al continuo abastecimiento a las reacciones de fusión nuclear.

Como bien se mencionó con anterioridad, la reacción de fusión es exotérmica hasta llegar al hierro, donde pasa a convertirse en endotérmica. Esto, para las estrellas, quiere decir mucho, puesto que en cuanto se produce el primer núcleo de hierro, están condenadas. Debido a que la fusión es una reacción en cadena, los núcleos de los elementos originados de la reacción primigenia, la del hidrógeno, continúan fusionándose, produciendo aún energía. Esto es así hasta que el hierro entra en escena, absorbiendo lo que las otras reacciones están generando, haciendo que la estrella irradie menos energía y provocando que se eleve la cantidad de núcleos de elementos pesados en la estrella debido a la continuidad de la fusión nuclear.

Una vez las estrellas comienzan a morir, pueden hacerlo de formas completamente diferentes, y esto es debido a que este proceso depende de la masa que tengan:

- Para estrellas cuya masa sea inferior a $5 M_{\text{sol}}$, al formar la fase de gigante roja, expulsan las capas exteriores. Una vez ocurrido esto, el restante que queda es el núcleo degenerado de la estrella, rico en carbono y oxígeno, llamado también enana blanca.
- Por el contrario, si las estrellas poseen una masa superior a 9 ó $10 M_{\text{sol}}$, realizan toda su evolución hasta el llamado pico del hierro, donde agotan toda la energía potencial nuclear de la que disponen, transcurriendo las últimas etapas más rápido



debido a la fusión del silicio en hierro. En función a su vez de la masa y la metalicidad²⁶, tendrán 4 finales posibles:

- La mayoría producirá una supernova y una estrella de neutrones.
- Si la masa es superior a $30 M_{\text{sol}}$, parte de las capas de la supernova no podrán escapar de la gravedad de la estrella de neutrones y se producirá un segundo colapso en un agujero negro.
- Si la masa es superior a $40 M_{\text{sol}}$ y poseen baja metalicidad, se producirá un remanente inicial de agujero negro por lo que no se producirá una supernova.
- Si la masa solar oscila entre 140 y $260 M_{\text{sol}}$ y teniendo muy baja metalicidad, se producirá una supernova de pares electrón-positrón, desintegrándose así la estrella por completo.

3.1.2. Tipos de confinamiento de un plasma

Para llevar a cabo la fusión nuclear de manera eficiente es necesario que esté en unas determinadas condiciones. Para ello se ha de asegurar que la cantidad de núcleos presentes en las condiciones óptimas sea grande, lográndose esto encerrando un gas compuesto por los átomos de combustible en una cierta región y manteniéndolo confinado bajo determinadas condiciones.

Además, los requisitos para que la fusión se produzca son conocidos como “Criterio de Lawson”, enunciado por John Lawson en 1957, el cual dice que para que una reacción de fusión de elementos ligeros (Deuterio y Tritio) sea llevada a cabo de manera que el sistema sea rentable desde el punto de vista energético²⁷, es necesario que se cumpla una relación entre el tiempo de confinamiento y la densidad del plasma

Ello hace que la densidad de partículas del gas tenga que ser alta y que el tiempo medio para las pérdidas de energía también sea largo, debido a los criterios que establecen que, para densidades bajas y tiempos cortos, las pérdidas y ganancias de energía son prácticamente iguales.

A su vez, esto expresa que el producto del tiempo de confinamiento de la energía, τ_E , y la densidad n ha de ser mayor de una cierta cantidad que depende de la temperatura del gas, T , y de la eficiencia entre la conversión a energía útil de la energía de fusión, ϵ , así como del mecanismo usado para realizar la fusión, siendo que:

²⁶ La metalicidad es un concepto de astrofísica utilizado para la descripción de los elementos más pesados que el helio en una estrella, recibiendo éstos el nombre de metales, aunque no formen parte de ellos en la tabla periódica. También se le llama electronegatividad.

²⁷ Para que un sistema sea rentable desde el punto de vista energético, la energía producida por el sistema ha de ser mayor que la energía consumida por el mismo.



$$n\tau_E > \text{Factor}(T, \epsilon) \quad (15)$$

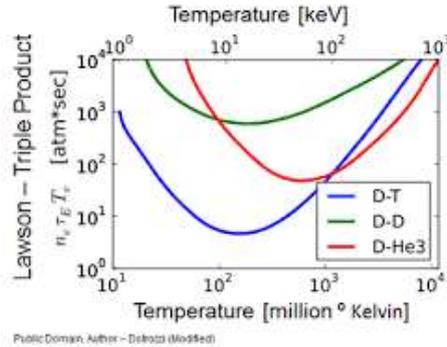


Figura 28 - Criterio de Lawson. FUENTE: <http://science.fusion4freedom.us/nuclear-fusion-reactors/>

A su vez, para la reacción DT tenemos que:

$$n\tau_E T \gtrsim 3 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \quad (16)$$

Siendo los valores típicos para las magnitudes características en cada método de confinamiento los siguientes:

Magnitud	Gravitatorio (Sol)	Magnético	Inercial
Temperatura [$\cdot 10^6$ K]	15	100	100
Densidad [m^{-3}]	10^{32}	10^{20}	10^{30}
Tiempo de Confinamiento [s]	∞	1	10^{-9}

Tabla 1 - Valores típicos de las magnitudes características en dependencia de los distintos tipos de confinamiento.

A su vez, los tipos de confinamiento pueden definirse de la siguiente forma:

○ **3.1.2.1. Confinamiento gravitatorio.**

El confinamiento gravitatorio es el que se da en el universo de forma natural. Se basa en el confinamiento de las partículas mediante el propio campo gravitatorio generado por ellas mismas. Generalmente, su origen está en que, al colapsar gravitatoriamente las nubes de plasma que hay en el universo, dándose el caso en el que la masa sea la necesaria para que las reacciones de fusión provoquen la ignición, se crea una estrella. El funcionamiento de una estrella queda correctamente definido en el apartado **3.1.1.**

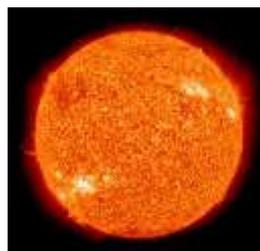


Figura 29 - Estrella, ejemplo de reactor de fusión nuclear por confinamiento gravitatorio. FUENTE: NASA



○ **3.1.2.2. Confinamiento inercial**

El confinamiento inercial trata de lograr la ignición termonuclear durante unas breves décimas de nanosegundo. Para ello se necesitan dos elementos: combustible nuclear, que es una esfera hueca de aproximadamente 1 o 2 mm de radio y que contiene unos 3 miligramos de deuterio-tritio (DT), y un haz láser.

El confinamiento inercial trata de lograr la ignición termonuclear durante unas breves décimas de nanosegundo. Para ello se necesitan dos elementos: combustible nuclear, que es una esfera hueca de aproximadamente 1 o 2 mm de radio y que contiene unos 3 miligramos de deuterio-tritio (DT), y un haz láser. La cápsula de combustible consta de 3 capas: la más exterior, de 0,003mm de espesor de plástico, la intermedia contiene DT helado y el núcleo DT gaseoso.



Figura 30 - Cápsula de DT para el confinamiento inercial. FUENTE: <http://francis.naukas.com/2012/01/09/la-ignicion-de-la-fusion-por-confinamiento-inercial-queda-fuera-de-la-agenda-del-nif-para-2012/>

Los pasos a seguir para lograr la fusión nuclear mediante este método son los siguientes:

- Se introduce la cápsula en el interior de la cavidad donde se llevará a cabo la reacción y se dispara sobre ella pares de haces coincidentes aumentando la energía de la capa externa, creándose alrededor de la capa externa una envoltura de plasma caliente. Los haces también pueden ser de iones.
- La energía se transfiere al interior, ocasionando una implosión del combustible DT. La región interna se comprime a medida que la capa externa libera energía de la fusión, debido a la energía que ha transferido el láser.
- Debido a la compresión a la que se ve sometida el interior, la energía cinética de las partículas del interior se transforma en energía interna a gran velocidad, causando un repentino aumento de la temperatura en la región central.

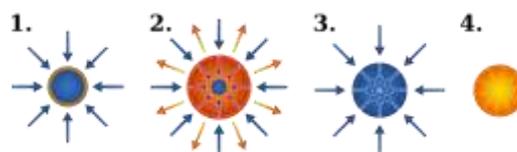


Figura 31 - Pasos a seguir en la fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE: <http://www.astrofiscayfisica.com/2014/02/la-fusion-nuclear-por-confinamiento.html>



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

La reacción ocurre solamente en una parte del DT existente en la cápsula, que es justamente el situado en la región más central, siendo las partículas α creadas en la reacción, con poco alcance, las que favorecen la propia reacción en el núcleo de la cápsula. A su vez, aquellas que logran escapar hasta la capa externa, aumentando su energía, también favorecen a la reacción. Durante el tiempo de confinamiento, el combustible también aumenta su densidad. También la radiación y neutrones emitidos por la reacción son depositados en las paredes de la cámara donde es llevado a cabo el proceso, siendo su energía absorbida y transferida a un líquido refrigerante, siendo éste el final del ciclo.



Figura 32 - Reactor de fusión nuclear mediante confinamiento inercial. FUENTE:
<https://portalhispano.wordpress.com/tag/fusion-nuclear/>

Matemáticamente se pueden definir varios parámetros del confinamiento inercial:

- El tiempo de confinamiento T_c ha de ser comparable con el tiempo de quemado termonuclear T_Q , siendo ambos:

$$T_c = \frac{R}{\sqrt{\frac{2kT}{m}}}, \quad (17)$$

$$T_Q = \frac{1}{\langle \sigma v \rangle n}, \quad (18)$$

siendo R el radio exterior del combustible, m la masa equimolar (en el caso del DT es 2,5 veces la masa del protón), K la constante de Boltzmann, T la temperatura, σ la sección eficaz, v la velocidad de los iones del plasma y n la densidad de iones.

- A su vez, la eficiencia viene dada por:

$$E = \frac{T_c}{T_Q} \quad (19)$$

Además, el láser en este tipo de confinamiento puede llegar a ser de 1 PW, los cuales pueden llegar a durar cientos de femtosegundos a intensidades superiores a



10^{18} W/cm². Son capaces de generar electrones de varios cientos de MeV. También suelen emitir pulsos en dos etapas, siendo el primer pulso de 10^{18} W/cm² para perforar la envoltura del plasma y después uno de 10^{20} W/cm² para penetrar en el interior y causar que los electrones cercanos al combustible aumenten su energía enormemente. Este mecanismo es conocido como ignición rápida.

Sin embargo, hay dos formas de atacar la cápsula con el láser:

- Mediante iluminación directa, haciendo que el láser incida directamente en la capa exterior, evaporando así su material superficial y creando una envoltura de plasma. Después, la energía se transmite al interior mediante conducción térmica, mientras que a su vez la superficie que interacciona con el láser avanza hacia el interior comprimiéndolo y creando ondas de choque en el combustible, hasta acelerarlo a unos 400000 m/s. Sin embargo, la desviación del láser con respecto a la normal de la cápsula ha de ser inferior al 1%, obligando a usar un enfoque muy preciso y varios haces, siendo un problema de difícil solución.

- Mediante iluminación indirecta, siendo usada por el NIF, se salva el inconveniente que posee la directa. El método se basa en que la cápsula se sitúa en el interior de un cilindro relleno de gas inerte y cuyas dimensiones son 2 cm de largo y 7 mm de diámetro, para más tarde introducir por los extremos un pulso láser que colisiona con las paredes interiores del cilindro. Éstas absorben el pulso y lo reemiten en forma de rayos X blandos. Así comienza su ciclo de absorciones y reemisiones, de hasta 10 veces, que crea un campo isótropo de radiación. Gracias a esto se evita la perfecta simetría que han de tener los haces coincidentes usados en iluminación directa.

○ 3.1.2.3. Confinamiento magnético

El confinamiento magnético tiene como objetivo el confinamiento y guiado de un gas plasmático ionizado en el interior de un reactor mediante la creación de campos magnéticos, siendo esto debido a las elevadas temperaturas en las que se encuentra el plasma hacen que no pueda estar en contacto con ningún otro material. Se basa en que las partículas cargadas sienten la fuerza de Lorentz debida al campo magnético:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (20)$$

El fundamento se basa en que las partículas cargadas del plasma, los iones y los electrones, se ven forzadas, gracias a los campos magnéticos, a tener órbitas circulares y a formar hélices sobre las líneas de campo. A su vez, éstas se pueden mover libremente en la dirección longitudinal de las líneas de campo.

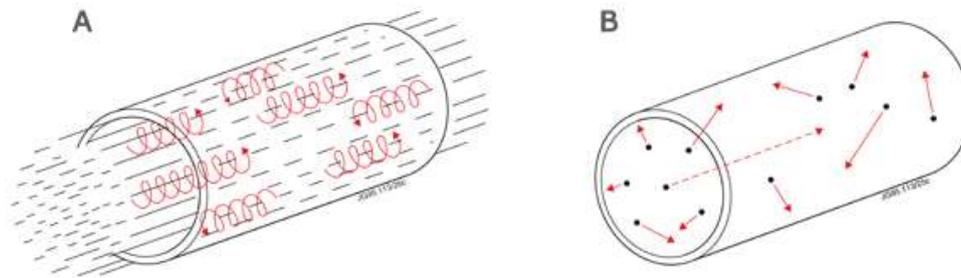


Figura 33 - Iones moviéndose alrededor de las líneas de campo magnético helicoidalmente e iones moviéndose sin líneas de campo magnético. FUENTE: <http://www.scienceinschool.org/node/2837>

Además, los campos magnéticos apropiados para este tipo de confinamiento son aquellos circulares que se cierran sobre sí mismos. Pero esto no mantiene el plasma totalmente confinado debido al decrecimiento de la intensidad de campo anular puro, haciendo que las partículas sean expulsadas hacia las paredes del reactor. Entonces, para evitarlo, se han de retorcer las líneas de campo para conseguir que el plasma quede permanentemente confinado mientras el campo magnético esté activo. Una vez realizado, las líneas de campo crean superficies magnéticas, anidadas entre sí, análogamente a una cebolla y sus capas. Un prerequisite obligado es la ausencia de una componente radial en el campo magnético, puesto que llevaría las partículas hacia el exterior del reactor.

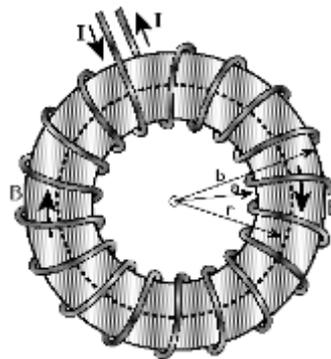


Figura 34 - Ejemplo de confinamiento mediante campos magnéticos. FUENTE: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/magnetic/toroid.html>

A su vez, hay dos tipos fundamentales de reactores de fusión nuclear mediante confinamiento magnético, los cuales serán descritos en el siguiente apartado.

3.1.3. Principales reactores de fusión nuclear por confinamiento magnético

En la actualidad, los reactores de fusión termonuclear son proyectos en fase experimental que en un futuro se utilizarán para la generación de energía de fusión termonuclear mediante iones confinados en campos magnéticos. Mediante este proceso de generación de energía se corresponden, entre otros, los dos tipos de reactores más



importantes: el modelo tipo Stellarator, como el español TJ-II de “*Tokamak de la Junta de Energía Nuclear*”, y el modelo tipo Tokamak, como el JET que proviene de “*Joint European Torus*” o Toro Común Europeo o el futuro ITER que proviene de “*International Thermonuclear Experimental Reactor*” o Reactor Termonuclear Experimental Internacional en español, pero curiosamente también significa “*camino*” en latín

A continuación, se procede a la explicación del funcionamiento de ambos tipos de reactores:

- **Reactor tipo Tokamak:**

El reactor tipo Tokamak²⁸ es un reactor que tiene forma toroidal (se asemeja a una rosquilla hueca). La Figura 35 muestra las características fundamentales de un reactor tokamak. El tokamak tiene dos campos magnéticos principales. El primero es el campo toroidal, que es producido por una bobina de un material superconductor, que minimiza las pérdidas energéticas debido al efecto Joule, en forma de toro. Al ser esto una disposición constructiva altamente compleja, se tienden a realizar una serie de bobinas de campo en las que la suma de los campos generados en todas ellas genera un campo toroidal. La segunda componente es la componente poloidal, siendo ésta generada por la corriente que atraviesa el plasma. Al combinarse ambos campos se da lugar a un enroscamiento de las líneas de campo sobre las superficies magnéticas, originando ello que el plasma se encuentre bien confinado y no pueda escapar. Por poner un orden de magnitud, el campo toroidal es del orden de 10 veces superior al campo poloidal.

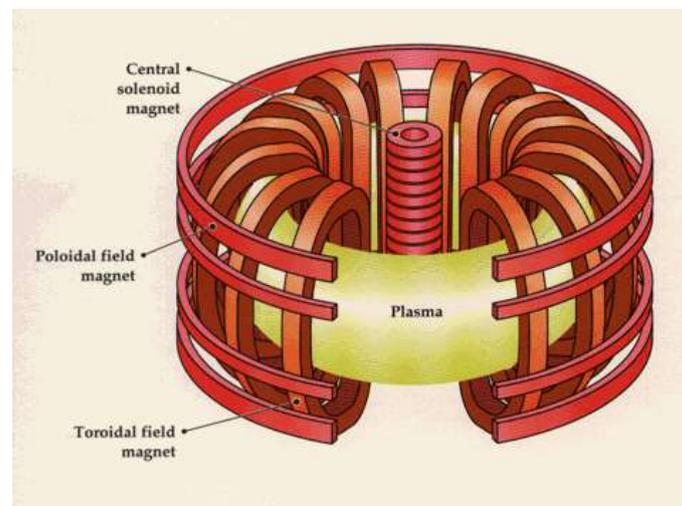


Figura 35 - Esquema de un tokamak en el que se muestra la inducción de corriente al plasma gracias a un trafo primario devanado. FUENTE: <http://lukyrh.blogspot.com.es/2016/01/seaaan-rojos-y-teoricos-intelectuales.html>

²⁸ Llamado así al ser un acrónimo ruso de “*TO*roidal'naya *KA*mera s *MA*gnitnymi *K*atushkami” o en español *cámara toroidal con bobinas magnéticas*.



El desarrollo del tokamak se remonta a los años 50 en la antigua Unión Soviética (URSS). El primer tokamak consistió en una cámara de vacío con forma toroidal en cuyo interior había hidrógeno y un dispositivo que mediante fuertes descargas provocaba la ionización del gas hasta convertirlo en plasma para que luego un fuerte campo helicoidal acabara por confinarlo.

Otras dos fechas destacadas fueron: mayo de 2000, donde físicos estadounidenses superaron el fenómeno de los ELMs (Edge Localized Modes) que son modos localizados en el borde de los tokamaks y que provocan la pérdida repentina de partículas y energía en el reactor, y en mayo de 2006 donde se firmó en Bruselas el acuerdo del proyecto ITER.

Más adelante se procederá al desarrollo de los dos reactores más importantes del tipo tokamak: el ya funcional JET y el aún por construirse ITER. Además, se hablará de lo que se espera que sea el primer reactor operativo, DEMO.

- **Reactor tipo Stellarator:**

El reactor tipo Stellarator²⁹ es un reactor con formas asemejadas a un toroide, cuyo campo poloidal es generado por la inducción de corrientes externas al plasma mediante bobinas. En la Figura 36 se puede observar el esquema del Heliac flexible del TJ-II, el stellarator español. El primer stellarator fue inventado en 1950 por el científico estadounidense Lyman Spitzer y construido solamente un año después en Princeton, en el Laboratorio de Física de Plasma. Perdieron relevancia debido a los tokamaks, pero resurgieron debido a los problemas que éstos presentaban allá por la década de 1990.

Los campos magnéticos de los stellarators son no uniformes y no simétricos.

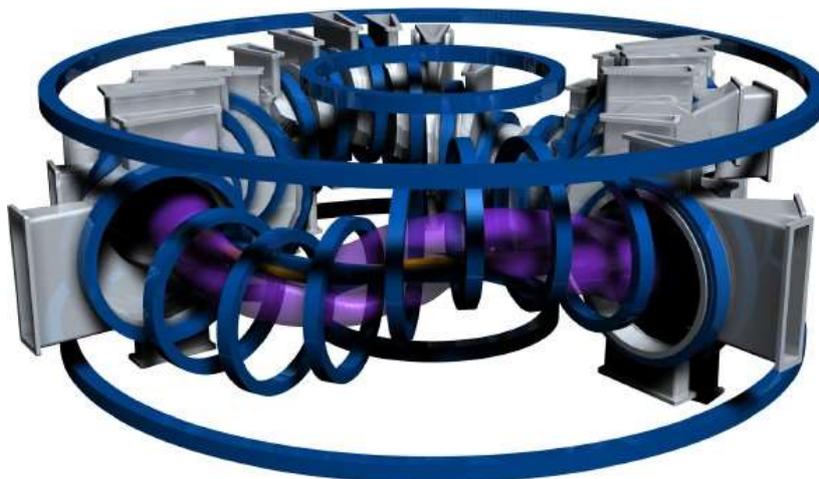


Figura 36 - Esquema del reactor Stellarator Heliac flexible TJ-II. FUENTE: <http://fusionsites.ciemat.es/tj-ii/>

²⁹ Su nombre hace referencia a “stella” o estrella y a “generator” o generador.



En la Figura 37 se pueden observar las principales diferencias entre las cámaras de fusión y la generación del confinamiento de un reactor tipo tokamak y uno tipo stellarator.

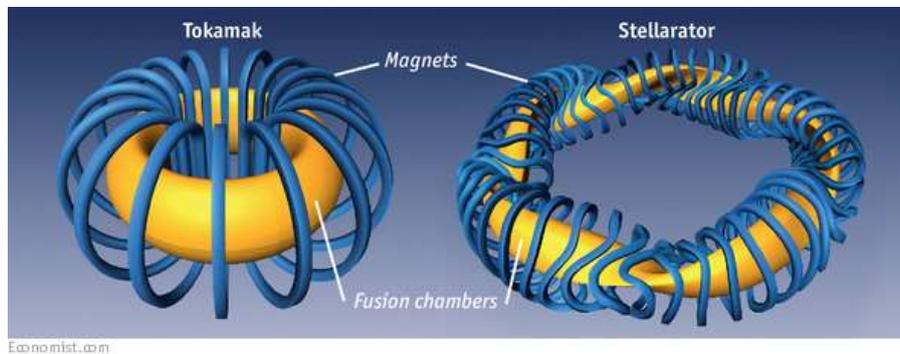


Figura 37 - Diferencias de un reactor tokamak a un reactor stellarator. FUENTE:

<http://www.economist.com/news/science-and-technology/21676752-research-fusion-has-gone-down-blind-alley-means-escape-may-now-be>

Debido a que el estudio se va a centrar en la generación de energía mediante la fusión nuclear en reactores tipo tokamak, se desecha el desarrollo de los reactores experimentales tipo stellarator.³⁰

• **3.1.4. Reactores Tokamak experimentales: presente y futuro**

Como ya se ha definido con anterioridad, actualmente los reactores tokamak son la apuesta principal a la hora de llegar a hacer una central de fusión termonuclear mediante confinamiento magnético totalmente operativa. Esto es debido a las bondades citadas con anterioridad.

El planteamiento recae ahora sobre conocer el panorama actual en cuanto a estos tipos de reactores y cuáles son sus perspectivas de futuro. Para ello se procederá a hablar sobre los 3 reactores más importantes que se pueden mencionar: el JET³¹, el ITER³² y el DEMO³³.

• **JET:**

El JET se trata del reactor tokamak operativo más grande del mundo en la actualidad. Se sitúa a las afueras de Oxford, en una vieja base de la RAF³⁴ cerca de Culham. Su construcción fue finalizada en 1983.

³⁰ Esto es debido a que, en la actualidad, en el desarrollo de los reactores de fusión nuclear mediante confinamiento magnético se ha priorizado por la construcción de reactores tipo tokamak, estando los tipo stellarator una generación por detrás.

³¹ El JET es un reactor tokamak que en la actualidad se encuentra en estado operativo.

³² El ITER es el gran proyecto por el cual se trata de demostrar la viabilidad de esta energía. Estado actual: en construcción.

³³ El DEMO espera ser la primera planta comercial de generación de energía mediante fusión nuclear. Estado actual: desarrollo temprano.

³⁴ RAF es la sigla en inglés para "Royal Air Force" o Real Fuerza Aérea, la división aérea del ejército inglés.



Está equipado con sistemas de manejo remotos para hacer frente a la radioactividad producida por el combustible DT. Logró en 1991 un pico de 1,7 MW de potencia, siendo el mejor registro hasta 2004, consiguiéndose una razón entre energía entrante y energía saliente del reactor de aproximadamente 0.7, queriendo decir que para conseguir 16 MW de potencia se necesitaron 22.8MW, lo cual imposibilita de momento su viabilidad, puesto que se necesita de una ratio superior a 1.

En 2004 fue cerrado para ser remodelado y aumentar su potencia hasta los 40 MW, siendo reabierto en 2005, permitiendo amplios estudios para desarrollar el ITER.



Figura 38 - Interior del horno del reactor JET. FUENTE: <http://www.abc.es/ciencia/20130707/abci-supermaquina-fabrica-energia-fusion-201307062226.html>

- **ITER:**

El ITER es un reactor de fusión termonuclear en desarrollo por diversas potencias mundiales³⁵, las cuales tratan de hacer viable la producción de energía mediante fusión. Su construcción está emplazada en Cadarache, Francia.

El ITER tiene como objeto probar todos y cada uno de los elementos para construir un reactor de fusión nuclear a escala comercial. Para ello se tratará de llegar a la ignición del combustible. Además, se pretende que la razón entre la energía suministrada por la reacción y la suministrada para que se pueda llevar a cabo sea bastante mayor que 1.

Que el combustible llegue a estado de ignición quiere decir que la reacción pueda ser autosostenida, es decir, que tras el pico de energía inicial que el sistema ha de introducir en el plasma para arrancar el reactor, sea la energía proporcionada por el propio plasma la que retroalimente la reacción, haciendo innecesario el aporte de energía externa.

Para ello es importante definir el llamado factor Q del plasma, es decir, la razón entre la energía consumida y la suministrada por la reacción:

$$Q_{DT} = \frac{\text{Potencia suministrada por la reacción}}{\text{Potencia de calentamiento auxiliar}}, \quad (21)$$

³⁵ Las potencias mundiales asociadas al ITER son la Unión Europea, Japón, Estados Unidos de América, Corea del Sur, la India, Rusia y China, haciendo un total de 25 naciones colaboradoras.



siendo la **Potencia suministrada por la reacción** aquella potencia que es generada mediante la fusión del plasma y la **Potencia de calentamiento auxiliar** aquella necesaria para llevar al plasma a las condiciones de fusión.

Es importante que este factor Q sea mayor que 1, puesto que eso hace que la potencia que suministra la reacción sea mayor que la de calentamiento, haciendo que esa potencia sobrante pueda ser usada mediante sistemas auxiliares para generación de energía.

En la Figura 39 queda reflejado aquello que se quiere llegar a conseguir con el ITER.

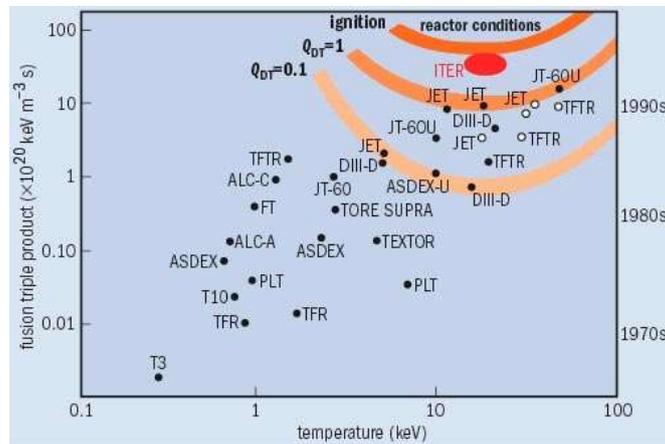


Figura 39 - Ratio de potencias de los diferentes reactores, incluido el ITER. FUENTE: <http://physicsworld.com/cws/Articles/ViewArticle.do?channel=news&articleId=24295>

Es importante también saber que cuando se habla de temperaturas del plasma suele usarse una conversión, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$T = \frac{1 \text{ eV}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}} = 11600^\circ\text{K} \rightarrow 1 \text{ eV} = 11600^\circ\text{K} \quad (22)$$

El ITER, a su vez, quiere demostrar las siguientes cosas:

1. Producir 500 MW de energía de fusión, con una potencia suministrada de 50 MW, lo que haría que el factor Q fuera de 10. Esa energía no sería capturada para convertirla en electricidad, pero, gracias a que sería el primer experimento de fusión en producir una ganancia de energía neta, prepararía el camino para una máquina que sí pudiera.
2. Demostrar las operaciones integradas de diferentes tecnologías con el fin de crear en el futuro una planta de generación mediante fusión nuclear, debido a que sería la primera planta experimental a escala grande, haciendo que los científicos puedan desarrollar sistemas para la extracción de energía, control del calor y demás sistemas propios de una central.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

3. Conseguir un plasma DT en el que la reacción sea autosostenida en el tiempo, esto quiere decir que el plasma se retroalimente, como se ha explicado con anterioridad.
4. Un test de producción del tritio, siendo una de las misiones para etapas posteriores del funcionamiento del ITER. Su función sería la de demostrar la viabilidad de producción del tritio dentro de la cámara de vacío. Esto es debido a que la oferta mundial de tritio no es suficiente para alimentar las necesidades de las futuras centrales, proporcionando así el ITER una oportunidad para probar una maqueta de mantos fértiles de tritio en un ambiente de fusión real.
5. Demostrar las características de seguridad de un dispositivo de fusión. ITER logró un hito importante en la historia de la fusión cuando, en 2012, la Organización ITER se licencia como un operador nuclear en Francia sobre la base del examen riguroso e imparcial de sus archivos de seguridad. Uno de los objetivos principales del funcionamiento del ITER es demostrar el control del plasma y las reacciones de fusión con consecuencias insignificantes para el medio ambiente.

Debido a todo esto, se desarrolló un calendario el cual estipulaba que para 2020 estaría el reactor ya ensamblado y para 2027 se introduciría el primer plasma DT, pero debido a diversos retrasos, aún no hay fechas definitivas para la conclusión de su construcción.

En Figura 40 se puede observar cómo sería el ensamblaje de la cámara del reactor y en los entes intervinientes en la construcción de las diferentes partes.

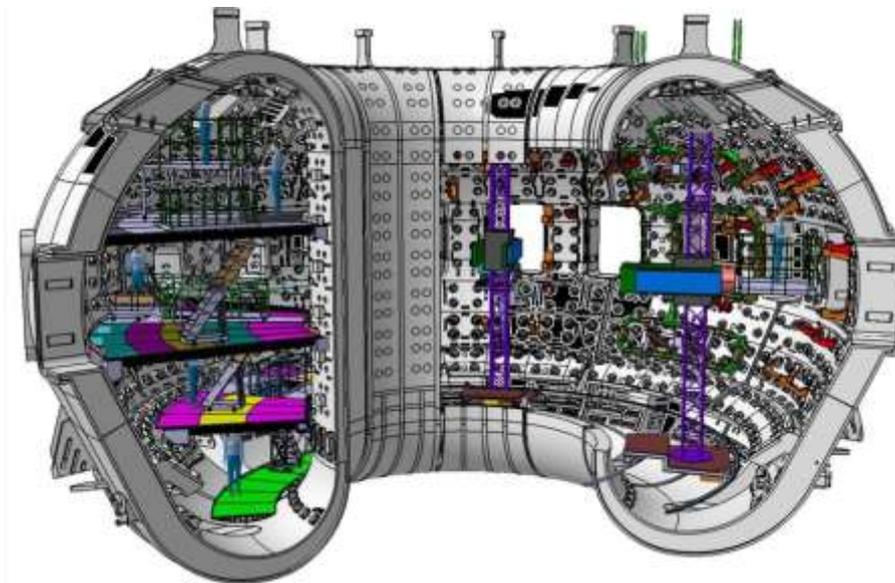


Figura 40 - Ensamblaje de la cámara del reactor. FUENTE: <https://www.iter.org/construction/construction>

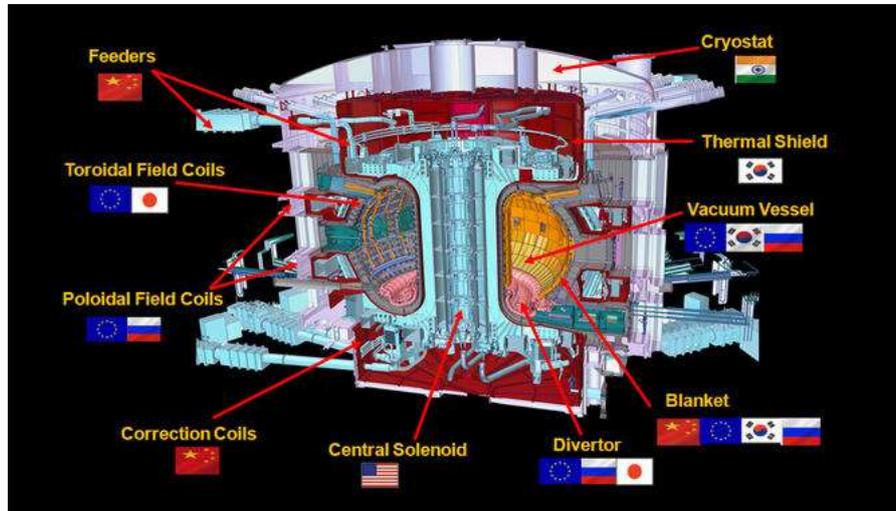


Figura 41 - Entes constructores de los diferentes elementos del reactor. FUENTE:
<http://www.agenciasinc.es/Reportajes/El-ITER-avanza-lento-pero-seguro>

A su vez, en la Tabla 2 podemos ver una comparativa de dimensiones con la cámara de combustión del JET, así como de otros parámetros, para así poder ver la evolución con respecto de su antecesor.

	JET	ITER
Radio mayor (m)	2.96	6.2
Radio menor (m)	1.25-2.10	2
Volumen del plasma (m ³)	100	837
Campo toroidal (T)	3.45	5.3
Corriente del plasma (MA)	4.8	15
Duración del pulso (S)	20	>300
Potencia de calentamiento (MW)	35	73

Tabla 2 - Comparativa entre el JET y el ITER. FUENTE: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/qb/iter/iter02.htm>

- **DEMO:**

El DEMO sería, en un futuro, el primer reactor de fusión nuclear totalmente operativo y con vocación experimental. Sería la primera de una serie de plantas para la generación de electricidad mediante esta vía. Es el paso siguiente al ITER, cuando éste último haya demostrado su completa viabilidad y se hayan estudiado todos los sistemas pertinentes para que una central de este tipo pueda ser 100% funcional.

La comunidad internacional, aún en desacuerdo, prevé que DEMO sea diseñado para producir entre 2 y 4 GW de potencia térmica, estando en la escala de una central eléctrica convencional.

Las dimensiones de DEMO se presuponen un 15% más grandes que las del ITER y la densidad del plasma un 30% mayor también.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

Como aún no se ha desarrollado el ITER, aún no se sabe muy bien cuando sería su construcción, pero, aun habiendo retrasos en el ITER, una buena línea cronológica de sucesos sería la siguiente:

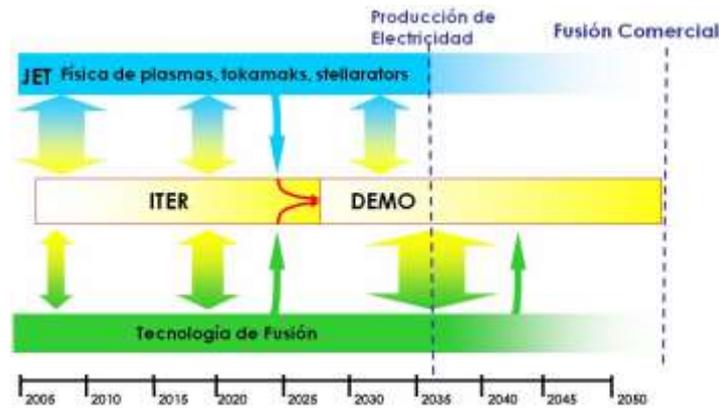


Figura 42 - Línea cronológica para la ejecución de DEMO (inexacta). FUENTE: CERN

A su vez, un esquema del funcionamiento podría ser el siguiente:

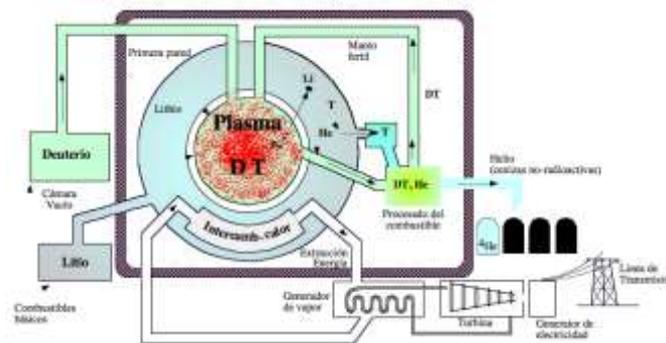
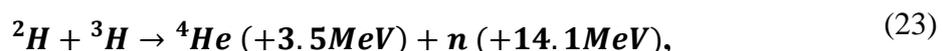


Figura 43 - Posible esquema de funcionamiento de DEMO. FUENTE:
http://www.conicit.gq.cr/boletin/boletin75/plasmas_fusion_nuclear2.html

Por otra parte, DEMO no sería la central final, dado que aún estamos hablando de un reactor experimental. La primera central comercial plenamente operativa, de la cual aún no hay nada proyectado, se llamaría PROTO³⁶.

La reacción que se espera que se lleve a cabo dentro de DEMO sería:



donde ${}^2\text{H}$ es el núcleo del Deuterio, ${}^3\text{H}$ es el núcleo del Tritio, ${}^4\text{He}$ es el núcleo del Helio-4 y n es un Neutrón.

³⁶ PROTO viene del acrónimo "PROTOTYPE Power Plant" o "Planta de Generación Prototipo".



3.2. Análisis científico

En este apartado, una vez ha sido estudiada la fusión nuclear en sus vertientes, así como de lo que el futuro la depara, se procede a la revisión del panorama de los artículos, bibliografía específica y resúmenes con el fin de saber cuál es la actualidad entorno a la investigación científica en dicho campo, para así dar un mejor enfoque a este estudio.

El análisis será realizado gracias a una base de datos, siendo utilizada en este caso *Scopus* debido a que es aquella que mejores resultados arroja en cuanto a calidad se refiere. El acceso a esta base de datos es proporcionado por la Universidad de Cantabria, puesto que el fondo de textos de dicha universidad también se haya en dicha base.

El funcionamiento de esta base de datos es sencillo. Se basa en la introducción de campos de palabras las cuales delimitarán aquello que se quiere buscar, siendo utilizado en este caso el campo de palabras clave, ya sean solas o en grupos, con el fin de acotar aquellas publicaciones de relevancia para el estudio. También se puede acotar el rango temporal que se quiere abarcar, con el fin de poder ver la evolución en la publicación de artículos en un rango determinado de tiempo. Además, podemos delimitar el tipo de documento al que se quiere tener acceso con el fin de realizar una búsqueda más específica. A su vez, podemos acotar más la búsqueda con el fin de buscar en 4 áreas, siendo éstas:

1. Ciencias de la Vida: son aquellas entre las que se encuentran la agricultura, bioquímica o neurociencia entre otras.
2. Ciencias de la Salud: son aquellas entre las que se encuentran la medicina, la enfermería o la veterinaria entre otras.
3. Ciencias Físicas: son aquellas entre las que se encuentran la ingeniería, las matemáticas, la química o la física entre otras.
4. Ciencias Sociales y Humanidades: son aquellas entre las que se encuentran las artes, la psicología o la economía entre otras.

Debido a que el fin del presente estudio pretende darle una viabilidad a la fusión nuclear, los campos elegidos serán los campos 3 y 4. Esto es debido a que en uno de ellos puede darse en caso de que se hable de toda la teoría de la fusión nuclear y sus cálculos, así como de la ingeniería que ello requiere, y en el otro caso puede hablarse de la cuantificación económica, así como de la repercusión social que pudiera tener.

Para la primera búsqueda se han empleado los criterios que aparecen en la Figura 44, arrojando un total de 15561 artículos distribuidos entre 1968 y 2016.

Al realizar la segunda búsqueda han sido arrojados 1006 resultados comprendidos entre 1969 y 2016 usando las palabras clave “*nuclear fusion*” y “*power plant*”, con el objetivo de dirimir cuantos artículos hay que hablen de plantas de generación de energía mediante fusión nuclear.

Para la tercera búsqueda, los resultados han sido de 53 resultados usando las palabras clave “*nuclear fusion*” y “*future*”, comprendidos entre 1981 y 2015.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura fuente de energía.

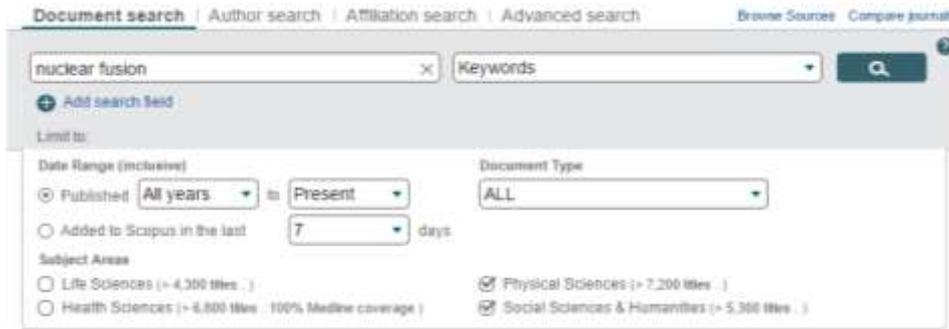


Figura 44 - Datos introducidos en la primera búsqueda.

En la cuarta búsqueda, se han empleado como palabras clave “nuclear fusion” y “viability”, arrojando un resultado de 23 resultados comprendidos entre 1996 y 2015, para así contemplar a su vez cuántos hacen mención a la viabilidad, ya sea técnica y/o económica, de la energía de fusión nuclear.

Los resultados arrojados en la tercera y cuarta búsqueda, al ser un número reducido, han sido revisados individualmente para así ver la importancia que podrían tener de cara al presente estudio.

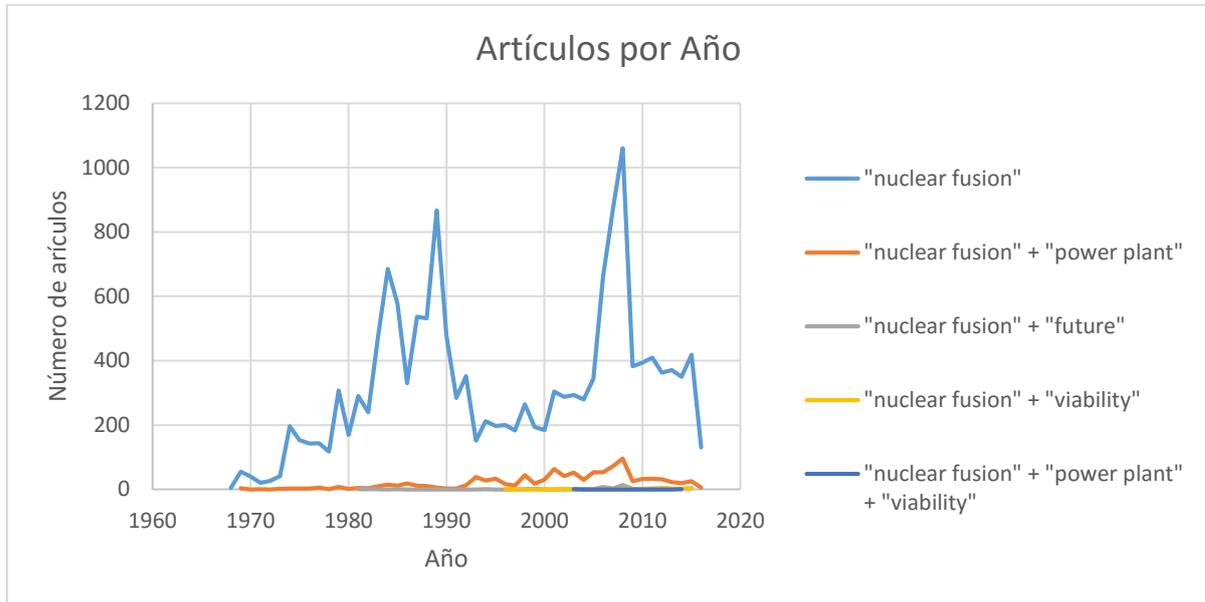
Pero es, sin embargo, al realizar una quinta búsqueda en la que los 2 resultados que nos arroja, uno del año 2004 y otro del año 2014, al usar como palabras clave “nuclear fusion”, “power plant” y “viability”, hace orientar el análisis científico en uno de ellos, puesto que es el que más interés pueden tener a la hora de la realización del presente estudio. El otro artículo a analizar será mediante la segunda búsqueda, al ser uno de los resultados arrojados de alto interés.

A continuación, serán expuestos los datos totales de las búsquedas realizadas para una vista más aclarativa:

Criterio de búsqueda (palabras clave)	Número de Artículos
“nuclear fusion”	15561
“nuclear fusion” + “power plant”	1006
“nuclear fusion” + “future”	53
“nuclear fusion” + “viability”	23
“nuclear fusion” + “power plant” + “viability”	2

Tabla 3 - Número de artículos encontrados usando los diferentes criterios de búsqueda.

Además, se incluirá la Gráfica 1 en la que se puede ver la evolución temporal de las diferentes búsquedas, para poder analizarlo con posterioridad.



Gráfica 1 - Cantidad de artículos por año usando los diferentes criterios de búsqueda.

En la Gráfica 1 podemos observar las evoluciones temporales usando los diferentes criterios de búsqueda.

Resulta interesante en la primera búsqueda usando “*nuclear fusion*” el análisis de las dos grandes anomalías que presenta, siendo la primera en el año 1989 debido al desarrollo de reactores tipo stellarator debido a los problemas que por aquel entonces tenían los tokamak, y la segunda en 2008 debido al ITER y su evolución para con DEMO.

Algo parecido ocurre cuando se usa “*nuclear fusion*” y “*power plan*” juntos, debido a que el pico le tiene como la anterior en 2008, siendo una anomalía debida al ITER y su evolución en DEMO.

Ocurre exactamente lo mismo con la búsqueda usando “*nuclear fusion*” y “*future*” pero no así con “*nuclear fusion*” y “*viability*”, dado que ésta última presenta el pico en 2012.

A continuación, se procederá al análisis de los dos artículos elegidos usando los criterios de búsqueda anteriormente citados.

El primer artículo analizado, obtenido mediante los criterios de la segunda búsqueda, será “*Short- and long-range energy strategies for Japan and the world after the Fukushima nuclear accident*” cuyo ISSN es 17480221. En dicho artículo, realizado en 2016, se habla de la repercusión que tuvo el accidente de la central nuclear de Fukushima Dai-chi en 2011, analizando además que fue acrecentado debido a la toma de conciencia de la sociedad en cuanto al calentamiento global. Ello hace que el consumo de combustibles fósiles tenga que ser reducido en un 80% para 2050, o al menos esa es la meta. Para ello se habla de la instalación de fuentes de energía alternativa, con el inconveniente según los autores de que la energía eólica y fotovoltaica sólo podrían



generar un 40% del consumo, siendo necesario en una estrategia a medio plazo el uso de sistemas de almacenamiento de energía. Para la estrategia a largo plazo, más allá de 2050, se espera que el uso de fuentes de energía como la fusión termonuclear unidas a los sistemas de almacenamiento solucionen los problemas energéticos de la humanidad. Las palabras clave usadas por los autores en este artículo son: “*Analysis and statistical methods*”, “*Data processing methods*” y “*Simulation methods and programs*”.

El segundo artículo, obtenido mediante los criterios de la quinta búsqueda, será “*PROCESS: A systems code for fusion power plants - Part 1: Physics*” cuyo ISSN es 09203796. En este artículo se habla de PROCESS, un programa cuyo código informático analiza y evalúa la física, ingeniería y economía de las hipotéticas centrales de fusión nuclear. Dicho programa utiliza un modo de optimización en el que los parámetros son maximizados o minimizados en función de un coeficiente dado según unas entradas y unas restricciones específicas. El alcance de dicho programa, cuyo código es preciso, es mucho más que la física del reactor, involucrando desde la conversión del calor en electricidad, el propio edificio, etc. Se han realizado ensayos sobre el modelo del ITER arrojando diferentes escenarios. A su vez, se han obtenido dos modelos para DEMO: DEMO A que ha sido destinada a ser conservadora, suponiendo que los sistemas de conversión únicamente conviertan el 12% del calor en electricidad en un escenario normal, siendo el optimista de hasta el 33% de la energía térmica del reactor convertida en energía eléctrica; y DEMO B, que pretende ser aún más optimista. Al ser un programa que analiza más allá del plasma, la física del plasma está descrita de forma simplista en el código, necesitándose del futuro análisis del funcionamiento del ITER para mejorar y extrapolar desde la perspectiva de la física del plasma. Las palabras clave usadas por los autores son: “*Deuterium*”, “*Economics*”, “*Fusion reactor*”, “*Thermonuclear*” y “*Tritium*”.

Estos dos artículos son interesantes debido a que el primero resalta la importancia de mirar hacia la energía de fusión nuclear debido a que es el futuro y el segundo debido a que gracias a PROCESS nos es posible hacer escenarios hipotéticos sobre DEMO. A su vez el segundo nos da un aporte para el estudio y es que, siendo optimistas, se podrá diseñar un sistema para la extracción de energía térmica del reactor que convierta el 33% de esa energía en energía eléctrica, siendo éste último dato usado como base para determinados cálculos del estudio.



4. METODOLOGÍA

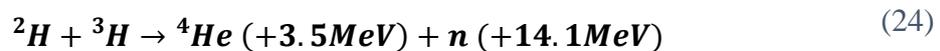


A continuación, se procede a la definición de la metodología a emplear en el presente estudio. Para ello se tratarán de aplicar conocimientos descritos en la teoría del capítulo 3, así como de conocimientos propios. A su vez, la correcta definición de la metodología será de ayuda a la hora de escoger los datos para la realización del estudio.

- **Cálculo del combustible necesario.**

Para la realización del cálculo del combustible necesario para la operatividad del reactor serán necesarios definir diferentes parámetros:

- La reacción que se lleva a cabo en el reactor, siendo en este caso:



donde ${}^2\text{H}$ es el núcleo del Deuterio, ${}^3\text{H}$ es el núcleo del Tritio, ${}^4\text{He}$ es el núcleo del Helio-4 y n es un Neutrón.

- La energía que se aprovecha, siendo ésta calculada mediante estimaciones. Dichas estimaciones se basan en que el aprovechamiento, según fuentes de ITER, se va a realizar mediante la captura de neutrones y a su vez, mediante PROCESS se calcula que dichos sistemas tendrán un 33% de rendimiento en el caso más óptimo.

- Una vez obtenida la potencia térmica necesaria, se calcularán los moles de neutrones que se necesitan para darla, pero, debido a que el Deuterio y el Tritio tienen una pequeña probabilidad de fusión, se toma esta como una probabilidad calculada gracias a los datos del ITER.

- Se prosigue con el cálculo de los moles de Deuterio y Tritio necesarios.

- Se calcula además la masa necesaria de Deuterio y Tritio, así como el volumen del plasma, considerando una densidad de plasma como la del ITER.

- Se calcula la cantidad mínima necesaria para un año a pleno funcionamiento las 24h del día.

- Se corrige con un factor en base al tiempo estimado de paradas programadas.

- Se realizan de nuevo los cálculos, tomando esta vez como nuevos datos la densidad del plasma de DEMO, siendo ésta un 30% mayor que la del ITER y las dimensiones lineales de DEMO, que serán un 15% mayores, haciendo que su volumen de plasma sea mucho mayor. Dicho cálculo deberá llevarse a cabo multiplicando la densidad del plasma del ITER por 1,3 y a su vez multiplicando el volumen del ITER por $1,15^3$ por aumentar sus dimensiones lineales en un 15% así como de un factor 1,3 para poder obtener la densidad del plasma necesario.

- **Impacto Ambiental**



A la hora de estimar el impacto ambiental que puede producir una central de fusión nuclear, se han de tener en cuenta diversos apartados, los cuales serán ponderados del 0 al 4, para así obtener, al final del todo, una estimación del impacto que producen:

1. Impacto visual: según la zona, el impacto visual será más o menos importante. Las zonas serán clasificadas en:
 - Zona desértica: 0
 - Zona industrial: 1
 - Zona poco poblada: 2
 - Zona medianamente poblada: 3
 - Zona altamente poblada: 4
2. Vertidos gaseosos: según la cantidad de vertidos de gases perniciosos (CO_2 , NO_x , etc.) se evaluarán los vertidos a la atmósfera de la siguiente forma:
 - Vertidos nulos: 0
 - Vertidos de baja cantidad: 1
 - Vertidos de cantidad moderada: 2
 - Vertidos de alta cantidad: 3
 - Vertidos de muy alta cantidad: 4
3. Vertidos líquidos: según la cantidad de líquidos vertidos (jabones, ácidos, etc) se evaluarán de la siguiente forma:
 - Vertidos nulos: 0
 - Vertidos de baja cantidad: 1
 - Vertidos de cantidad moderada: 2
 - Vertidos de alta cantidad: 3
 - Vertidos de muy alta cantidad: 4
4. Residuos: a su vez se evaluarán los residuos generados por la planta de la siguiente forma:
 - Ningún tipo de residuo: 0
 - Residuos de baja actividad, material de oficina y residuos orgánicos: 1
 - Residuos de media y baja actividad, material de oficina y residuos orgánicos: 2
 - Residuos de alta, media y baja actividad, material de oficina y residuos orgánicos: 3
 - Residuos de alta, media y baja actividad, material de oficina, residuos orgánicos y agentes químicos: 4

- **Coste económico.**

El coste económico será calculado en función de varios parámetros:

1. Coste de la central, el cual se realizará mediante estimaciones realizadas por la comunidad internacional, al no contar todavía con números económicos reales de lo que pudiera costar.



2. Coste del combustible, tomando como referencia en lo calculado en el primer apartado, se calculará el coste de abastecimiento de la central objeto.

Debido a que el coste de personal puede ser muy variable, dado que depende del país, de la potencia y de muchos otros aspectos, no será calculado, quedando este como una variable no calculada a tener en cuenta.

- **Abundancia del combustible**

Se analizarán las reservas de combustible, tanto para la central objeto del estudio como para todas las centrales tipo, con el fin de ver el tiempo de abastecimiento.

- **Opinión social**

Se tendrá en cuenta la opinión social sobre este tipo de energías, obteniéndose de medios de comunicación de ámbito internacional. Se clasificará en:

1. Deplorable.
2. Muy mala.
3. Mala.
4. Regular.
5. Buena.
6. Muy buena.
7. Excelente.

- **Elaboración de la Matriz**

Se elaborará una matriz con el resumen de los cálculos anteriores con el fin de poder hacer una comparación rápida con otros tipos de energía.



5. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DEL ESTUDIO



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

El presente estudio tiene por objeto el análisis de la implantación de una futurible central de fusión termonuclear mediante confinamiento magnético, tipo ITER, con el fin de estudiar su viabilidad. Para ello se definen los siguientes parámetros, por los cuales queda definida la central:

1. Potencia eléctrica necesaria: 1 GW.
2. Combustible usado: plasma de Deuterio y Tritio.
3. Sistema de captura energética mediante la captura de neutrones de la reacción, con un rendimiento del 33%.
4. Coste del Deuterio: 700 €/kg.
5. Coste del Tritio: 26720 €/g.
6. Vertidos a la atmósfera: vapor de agua de los sistemas de refrigeración abiertos de los intercambiadores de calor.
7. Vertidos a la biosfera: no se vierte ningún agente perjudicial a la biosfera.
8. Residuos: los residuos considerados serán de baja actividad, así como material de oficina y residuos orgánicos debidos al comedor y a los aseos.
9. Se pondrá a una distancia de 1 km de la población más cercana, de 100000 habitantes, estando en las cercanías de un río en la loma de un monte.
10. Se parará durante 1 semana cada 6 meses para revisión de componentes.

Dicha central, a su vez, generará en su totalidad 2000 puestos de empleo entre desarrollo, construcción y operación.



Figura 45 - Ejemplo de construcción del reactor experimental ITER. FUENTE: <https://www.iter.org>



6. CÁLCULOS REALIZADOS



6.1. Resultados Obtenidos

Los cálculos realizados han sido llevados a cabo siguiendo la metodología anteriormente descrita, siendo a continuación detallados:

- **Cálculo del combustible necesario**

El cálculo del combustible necesario, siguiendo la metodología previamente descrita, ha sido llevado a cabo para 4 posibles hipótesis. Dichas hipótesis se centran en el análisis de la probabilidad de que se dé la reacción de fusión nuclear en los siguientes casos:

1. Siguiendo los datos del ITER.
2. Siguiendo datos de DEMO para 2 GW_{th} .
3. Siguiendo datos de DEMO para 3 GW_{th} .
4. Siguiendo datos de DEMO para 4 GW_{th} .

1. Según los datos del ITER.

Según datos ITER		
Densidad del Plasma	1E+14	iones/cm ³
Matm Deuterio	2,01410178	uma
Matm Tritio	3,0160492	uma
1 uma	1,66054E-27	kg
Consideramos 50% Deuterio y 50% Tritio		
Masa media a 0,5 mol de D y T	2,51507549	uma
Densidad del Plasma	4,17638E-13	kg/cm ³
Volumen ITER	837	m ³
Masa Plasma ITER	0,000349563	kg
Potencia Térmica ITER	500	MW
1 mol	6,02214E+23	partículas
Reacción		
$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} (+3.5\text{MeV}) + n (+14.1\text{MeV})$		
Calculamos los moles de Deuterio y Tritio en el plasma		
Moles de Deuterio	0,069493554	mol
Moles de Tritio	0,069493554	mol
Moles de Neutrones	0,069493554	mol
Energía Neutrón	14,1	MeV
1 MeV	1,60218E-13	J
Energía Neutrones Reacción	94542035834	J
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Potencia Reacción	94542035834	W
Calculamos la probabilidad de reacción, dividiendo la potencia térmica entre la potencia real		
Probabilidad de la reacción	0,528865277	%



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

Calculo del combustible necesario para la central		
Potencia Demandada	1	GWe
Potencia Térmica	3	GWth
Rendimiento de la Reacción	0,528865277	%
Potencia Reacción	5,67252E+11	W
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Energía Reacción	5,67252E+11	J
Energía de los Neutrones	5,67252E+11	J
Moles de Neutrones	0,416961323	mol
Moles Deuterio	0,416961323	mol
Moles Tritio	0,416961323	mol
Masa Deuterio	0,839802543	g/s
Masa Tritio	1,257575865	g/s
Masa Combustible	2,097378408	g/s
Consideramos que el año tiene 52 semanas		
Se hacen parones por un total de 2 semanas		
En el caso más desfavorable de que siempre se tenga que renovar siempre el 100% del plasma cada segundo		
Tiempo en funcionamiento	50	semanas
Combustible necesario	63424,72305	kg
Si cada segundo renovamos sólo un 1% del plasma mediante inyección de pellets		
Combustible necesario	634,2493279	kg

2. Siguiendo datos de DEMO para 2 GW_{th}.

Según datos DEMO a 2 GW _{th}		
Densidad del Plasma	1,3E+14	iones/cm ³
Matm Deuterio	2,01410178	uma
Matm Tritio	3,0160492	uma
1 uma	1,66054E-27	kg
Consideramos 50% Deuterio y 50% Tritio		
Masa media a 0,5 mol de D y T	2,51507549	uma
Densidad del Plasma	5,42929E-13	kg/cm ³
Volumen ITER	1654,864088	m ³
Masa Plasma ITER	0,000898475	kg
Potencia Térmica ITER	2000	MW
1 mol	6,02214E+23	partículas



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

Reacción		
$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} (+3.5\text{MeV}) + n (+14.1\text{MeV})$		
Calculamos los moles de Deuterio y Tritio en el plasma		
Moles de Deuterio	0,178617805	mol
Moles de Tritio	0,178617805	mol
Moles de Neutrones	0,178617805	mol
Energía Neutrón	14,1	MeV
1 MeV	1,60218E-13	J
Energía Neutrones Reacción	2,42999E+11	J
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Potencia Reacción	2,42999E+11	W
Calculamos la probabilidad de reacción, dividiendo la potencia térmica entre la potencia real		
Probabilidad de la reacción	0,823047348	%
Calculo del combustible necesario para la central		
Potencia Demandada	1	GWe
Potencia Térmica	3	GWth
Rendimiento de la Reacción	0,823047348	%
Potencia Reacción	3,64499E+11	W
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Energía Reacción	3,64499E+11	J
Energía de los Neutrones	3,64499E+11	J
Moles de Neutrones	0,267926707	mol
Moles Deuterio	0,267926707	mol
Moles Tritio	0,267926707	mol
Masa Deuterio	0,539631658	g/s
Masa Tritio	0,80808013	g/s
Masa Combustible	1,347711788	g/s
Consideramos que el año tiene 52 semanas		
Se hacen parones por un total de 2 semanas		
En el caso más desfavorable de que siempre se tenga que renovar siempre el 100% del plasma cada segundo		
Tiempo en funcionamiento	50	semanas
Combustible necesario	40754,80447	kg
Si cada segundo renovamos sólo un 2% del plasma mediante inyección de pellets		
Combustible necesario	815,0974371	kg



3. Siguiendo datos de DEMO para 3 GW_{th}.

Según datos DEMO a 3 GW _{th}		
Densidad del Plasma	1,3E+14	iones/cm ³
Matm Deuterio	2,01410178	uma
Matm Tritio	3,0160492	uma
1 uma	1,66054E-27	kg
Consideramos 50% Deuterio y 50% Tritio		
Masa media a 0,5 mol de D y T	2,51507549	uma
Densidad del Plasma	5,42929E-13	kg/cm ³
Volumen ITER	1654,864088	m ³
Masa Plasma ITER	0,000898475	kg
Potencia Térmica ITER	3000	MW
1 mol	6,02214E+23	partículas
Reacción		
$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} (+3.5\text{MeV}) + n (+14.1\text{MeV})$		
Calculamos los moles de Deuterio y Tritio en el plasma		
Moles de Deuterio	0,178617805	mol
Moles de Tritio	0,178617805	mol
Moles de Neutrones	0,178617805	mol
Energía Neutrón	14,1	MeV
1 MeV	1,60218E-13	J
Energía Neutrones Reacción	2,42999E+11	J
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Potencia Reacción	2,42999E+11	W
Calculamos la probabilidad de reacción, dividiendo la potencia térmica entre la potencia real		
Probabilidad de la reacción	1,234571022	%
Calculo del combustible necesario para la central		
Potencia Demandada	1	GWe
Potencia Térmica	3	GW _{th}
Rendimiento de la Reacción	1,234571022	%
Potencia Reacción	2,42999E+11	W
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Energía Reacción	2,42999E+11	J
Energía de los Neutrones	2,42999E+11	J
Moles de Neutrones	0,178617805	mol
Moles Deuterio	0,178617805	mol
Moles Tritio	0,178617805	mol
Masa Deuterio	0,359754438	g/s
Masa Tritio	0,538720087	g/s



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

Masa Combustible	0,898474525	g/s
Consideramos que el año tiene 52 semanas		
Se hacen parones por un total de 2 semanas		
En el caso más desfavorable de que siempre se tenga que renovar siempre el 100% del plasma cada segundo		
Tiempo en funcionamiento	50	semanas
Combustible necesario	27169,86965	kg
Si cada segundo renovamos sólo un 3% del plasma mediante inyección de pellets		
Combustible necesario	815,0969879	kg

4. Siguiendo datos de DEMO para 4 GW_{th}.

Según datos DEMO a 4 GW _{th}		
Densidad del Plasma	1,3E+14	iones/cm ³
Matm Deuterio	2,01410178	uma
Matm Tritio	3,0160492	uma
1 uma	1,66054E-27	kg
Consideramos 50% Deuterio y 50% Tritio		
Masa media a 0,5 mol de D y T	2,51507549	uma
Densidad del Plasma	5,42929E-13	kg/cm ³
Volumen ITER	1654,864088	m ³
Masa Plasma ITER	0,000898475	kg
Potencia Térmica ITER	4000	MW
1 mol	6,02214E+23	partículas
Reacción		
$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} (+3.5\text{MeV}) + n (+14.1\text{MeV})$		
Calculamos los moles de Deuterio y Tritio en el plasma		
Moles de Deuterio	0,178617805	mol
Moles de Tritio	0,178617805	mol
Moles de Neutrones	0,178617805	mol
Energía Neutrón	14,1	MeV
1 MeV	1,60218E-13	J
Energía Neutrones Reacción	2,42999E+11	J
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Potencia Reacción	2,42999E+11	W
Calculamos la probabilidad de reacción, dividiendo la potencia térmica entre la potencia real		
Probabilidad de la reacción	1,646094696	%



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

Calculo del combustible necesario para la central		
Potencia Demandada	1	GWe
Potencia Térmica	3	GWth
Rendimiento de la Reacción	1,646094696	%
Potencia Reacción	1,8225E+11	W
Tomando como unidad de tiempo el segundo		
Energía Reacción	1,8225E+11	J
Energía de los Neutrones	1,8225E+11	J
Moles de Neutrones	0,133963354	mol
Moles Deuterio	0,133963354	mol
Moles Tritio	0,133963354	mol
Masa Deuterio	0,269815829	g/s
Masa Tritio	0,404040065	g/s
Masa Combustible	0,673855894	g/s
Consideramos que el año tiene 52 semanas		
Se hacen parones por un total de 2 semanas		
En el caso más desfavorable de que siempre se tenga que renovar siempre el 100% del plasma cada segundo		
Tiempo en funcionamiento	50	semanas
Combustible necesario	20377,40224	kg
Si cada segundo renovamos sólo un 4% del plasma mediante inyección de pellets		
Combustible necesario	815,0967633	kg

En verde están resaltados los consumos de combustible globales para las diferentes hipótesis, quedando de la siguiente forma resumida:

	Combustible Total	Deuterio	Tritio	
Hipótesis 1	634,249	253,957	380,292	kg
Hipótesis 2	815,097	326,370	488,728	kg
Hipótesis 3	815,097	326,370	488,727	kg
Hipótesis 4	815,097	326,369	488,727	kg

A la vista de éstos resultados y debido a que tanto la geometría como el funcionamiento de DEMO no están completamente definidos, el gasto de combustible será el gasto de la hipótesis 1, con **253,957 kg de Deuterio y 380,292 kg de Tritio**.

- **Impacto Ambiental.**

La matriz de ponderaciones de impacto, definida en la metodología, dados los datos del estudio, queda de la siguiente forma:



Impacto	Valoración
Impacto Visual	3
Vertidos Gaseosos	0
Vertidos Líquidos	0
Residuos	1
TOTAL	4

- **Coste Económico**

El coste económico de una central de 1 GW_e de fusión termonuclear mediante confinamiento magnético aún no se sabe con certeza. Si bien, sabemos que la construcción del ITER ronda los 13.000 millones de €. Dado que es un reactor experimental, se puede decir que su precio es un precio demasiado alto dado que las tecnologías aún no están completamente definidas, por lo que haciendo estimaciones se puede cifrar en el futurible coste de una central de las características previamente descritas en aproximadamente 4.000 millones de €. La estimación se basa en la bajada de precios de la tecnología conforme éste avance.

El coste económico del combustible viene dado por el gasto del combustible anualmente, siendo:

	Deuterio	Tritio	Combustible Total	
Cantidad	253,957	380,292	634,249	kg
Precio	700	26720000	-	€/kg
TOTAL	177770	10161407560	10161585330	€

Dicho coste supondría un total de 10.161.585.330 € anuales, de los cuales 10.161.407.560 € son debidos al Tritio. La solución a éste problema sería poner unas placas de una aleación de Litio dentro del propio reactor, las fertilizarían el reactor con Tritio mediante la ecuación (6). Debido a que ésta tecnología aún está en desarrollo, no será implementada en el presente estudio, quedando así un coste aproximado de **4.000 millones de € más 10.161.585.330 € anuales.**

- **Abundancia del Combustible**

El Deuterio tiene una abundancia en la Tierra del 0,0156% respecto al total de átomos de hidrógeno, es decir, por cada 6500 átomos de hidrógeno, se tiene uno de deuterio. En cambio, el Tritio ha de ser obtenido artificialmente debido a que se desintegra, con un periodo de semidesintegración de 12.3 años. No obstante, la obtención del Deuterio artificial es sencilla. No así la del Tritio, necesitando así pues del desarrollo de las paredes fértiles de Litio para su obtención. Podemos calificar así el Deuterio de **abundante** y el Tritio de **poco abundante**, debido a las anteriores premisas.



- **Opinión Social.**

En cuando a la opinión social, nos podemos encontrar varias circunstancias. Desde la gente que está totalmente en contra de todo lo que tenga que ver con tecnología nuclear (Greenpeace, etc); pasando por la comunidad científica la cual, aunque tiene puntos de vista en algunos sentidos diferentes, está mayoritariamente a favor de la fusión termonuclear como sustituto de centrales convencionales que actúan como centrales base. Por último, nos encontramos a la sociedad de a pie, la cual en su mayoría tienen desinformación sobre este tipo de tecnologías.

El conjunto de estas tres circunstancias, hace ver que la opinión que pueda tener la sociedad como ente global en torno a esta energía pueda ser **Regular**, dado que, aunque presente numerosas ventajas con respecto a la gran mayoría de fuentes de energía, la palabra “nuclear” aún origina cierto pánico.

- **Elaboración de la Matriz**

Potencia de la Central	1 GW _e
Combustible Consumido	634,249 kg
Impacto Ambiental	4
Coste Económico	4.000 millones € + 10.161.585.330 € anuales
Abundancia del Combustible	Deuterio abundante y Tritio poco abundante
Opinión Social	Regular

6.2. Comparativa: Fusión vs Fisión

Dicha comparación la realizaremos mediante una comparación en la matriz final del apartado anterior, definiendo para ello los parámetros de la Fisión

Parámetros	Fusión	Fisión
Potencia de la Central	1 GW _e	1 GW _e
Combustible Consumido	634,249 kg	30.000 kg
Impacto Ambiental	4	10
Coste Económico	4.000 millones € + 10.161.585.330 € anuales	4.000 millones € + 15.000.000€ anuales
Abundancia del Combustible	Deuterio abundante y Tritio poco abundante	Óxido de Uranio escaso
Opinión Social	Regular	Deplorable

Se puede observar como la **Fusión Nuclear mediante Confinamiento Magnético** sale vencedora frente a la **Fisión Nuclear**.



7. CONCLUSIONES



Después del análisis realizado de la Fusión Nuclear, queda por tanto llegar a unas conclusiones para dar por finalizado este estudio.

Se puede comenzar por ver que las fuentes de energía convencionales pronto dejarán de existir, puesto que su durabilidad no trasciende más allá del siglo. Debido a ello es necesario buscar una fuente de energía la cual nos tenga asegurada la supervivencia como especie, así como del abastecimiento energético en pos del avance tecnológico que está experimentando y experimentará la sociedad.

Debido a esto, se han diseñado diversas fuentes de energía alternativas las cuales, a día de hoy, no pueden suplir la demanda de energía actual, además de no poder sustituir a centrales de generación base por ser fuentes de generación dependientes de factores temporales.

Al no poder estas fuentes suplir la futura demanda se trata de idear otro método, siendo dicho método la fusión termonuclear.

La fusión termonuclear tiene 3 variantes, de las cuales el estudio se centra a su vez en lo que la comunidad científica internacional se ha centrado en las últimas décadas: la fusión termonuclear mediante confinamiento magnético.

A día de hoy está claro que aún se van a necesitar muchos años de investigación para llegar a poner en marcha el primer reactor comercial del mercado, pudiendo incluso a no llegar a verlo muchos de nosotros si se siguen produciendo retrasos en los reactores experimentales que quieren hacerlo viable. No obstante, hay determinados obstáculos a salvar para que la fusión pueda ser llevada a cabo, siendo algunos de ellos:

- La tecnología de detritiación o tecnología para la obtención del Tritio suficiente para abastecer a las centrales.
- El desarrollo de un sistema de extracción del calor generado por las reacciones de fusión en los plasmas para su aprovechamiento.
- Los problemas que ocasionan determinadas partículas al colisionar con las paredes del reactor, activándolas y/o deteriorándolas.

A su vez, la fusión presenta varios retos:

- El reto tecnológico de poder llegar a hacerla viable.
- El reto de hacer que sea una energía a la cual todo el mundo tenga acceso.

Pero, salvando dichos obstáculos, puede decirse que la Fusión Termonuclear es el futuro de la energía. Esto puede hacerse mucho más palpable si la comparamos con la Fisión Nuclear, saliendo ésta última mucho peor parada.

Además de todo ello, la Fusión Nuclear presenta una serie de ventajas:

- Es imposible que se dé una reacción en cadena.



Estudio de viabilidad de la Fusión Nuclear como futura
fuente de energía.

- Si por cualquier motivo el plasma llegara a desconfinarsse, al encontrarse en una situación de vacío cuasiperfecto, no habría ningún tipo de riesgo para la integridad del reactor y de los operarios.
- Si se llegara a la tecnología que nos permitiera, mediante la reacción con el Litio, de la obtención del Tritio dentro del reactor, la cantidad de Tritio almacenada sería pequeña, siendo una ventaja puesto que el Tritio es radiactivo.
- Los residuos nucleares dejados por este método tienen un tiempo de vida muy cortos, considerándose de baja actividad.

Por ello, la Fusión Nuclear sale ganando por mucho en comparación a las energías convencionales, siendo la alternativa de futuro más viable si se desarrolla correctamente.

Por último, pero no menos importante, se ha de concienciar a la sociedad de los beneficios y las desventajas de la Fusión Nuclear, haciendo hincapié en que un sistema energético fiable es aquel que tiene centrales de generación base que puedan estar produciendo de continuo, haciendo que la energía de Fusión Nuclear sea la idónea para la sustitución de las fuentes de energía convencionales para la generación base. Para ello, además, se debería de dar la información a la sociedad de la forma más objetiva posible para que ellos se crearan su propia idea de lo que más les conviene, puesto que serán ellos como sociedad los que decidan, al final de todo, si esta tecnología podrá llevarse a cabo en su totalidad o tendrá impedimentos.

- **Conclusión Final**

La conclusión final es que la Fusión Nuclear mediante Confinamiento Magnético será el sustituto ideal a las fuentes de energía para las centrales de generación base.



8. BIBLIOGRAFÍA



8.1. Bibliografía

- Jaime Semprún (2007). “*La Nuclearización del mundo.*” Pepitas de Calabaza, Logroño. ISBN 978-84-935704-5-3.
- Paul A. Tipler (1991). “*Física. Tomo II.*” Editorial Reverte. ISBN 84-291-4357-2.
- Federico Goded Echeverría y Vicente Serradell García (1975). “*Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear. Tomo I.*” Publicaciones científicas de la JEN. ISBN 84-500-6999-8.
- Kenneth S. Krane (1988). “*Introductory nuclear physics.*” John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-80553-X.
- Davies, Paul: “*El universo desbocado.*” Salvat Editores, 1993. ISBN 84-345-8895-1.
- Ekrutt, Joachim: “*Estrellas y planetas.*” Everest Pub, 1996 ISBN 84-241-2746-3.
- Liboff, Richard L. (2002). “*Introductory Quantum Mechanics.*” Addison-Wesley. ISBN 0-8053-8714-5.

8.2. Webgrafía

- <http://energia-nuclear.net/>
- <http://www.minetur.gob.es/energia/Nuclear/Paginas/IndexEnergiaNuclear.aspx>
- <http://www.cchen.cl/index.php>
- <http://www.forumlibertas.com/energia-nuclear-a-debate-6-argumentos-a-favor-y-en-contra/>
- http://www.elmundo.es/especiales/2006/04/ciencia/energia_nuclear/debate/opiniones.html
- http://www.yosoy nuclear.org/index.php?option=com_content&view=article&id=95:energia-nuclear-y-medio-ambiente&catid=11:divulgacion&Itemid=22
- <http://www.scientificamerican.com/article/coal-ash-is-more-radioactive-than-nuclear-waste/>
- http://www.bp.com/content/dam/bp-country/es_es/downloads/PDF/Resumen%20ejecutivo%20SR%202015.pdf
- <http://www.ree.es/es/>
- https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015ES_SPANISH.pdf
- http://www.coiim.es/Comisiones/Energia/Descargas/EI%20MIX%20Electrico%20Espa%C3%B1ol_DEF.pdf



- http://economia.elpais.com/economia/2015/11/13/actualidad/1447410732_108693.html
- <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-reservas-de-gas-natural-mas-grandes-del-mundo/>
- <http://www.enagas.es/enagas/es/QuienesSomos/QueEsElGasNatural/YacimientoReservasMundiales>
- <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/115935-ixisten-suficientes-reservas-de-uranio-en-el-mundo>
- http://www.larazon.es/historico/2342-no-hay-muchas-mas-reservas-de-uranio-fisible-que-de-gas-o-petroleo-HLLA_RAZON_362381#.Ttt1MvACaUTCTND
- <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/07/12/que-es-la-fusion-nuclear/>
- <https://www.theguardian.com/science/life-and-physics/2011/aug/13/1>
- <http://triplenlace.com/2013/07/07/el-efecto-tunel-explica-que-se-den-en-el-espacio-reacciones-quimicas-que-no-se-producen-en-condiciones-normales/>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/nucene/lawson.html>
- <http://www.astrofisicayfisica.com/2014/02/la-fusion-nuclear-por-confinamiento.html>
- <https://www.euro-fusion.org/jet/>
- <https://www.iter.org/>
- <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120254-ique-es-el-iter>

8.3. Otros documentos de Apoyo

- Tesis doctoral ***“Turbulencia inducida por ondas de deriva en plasmas de fusión. Influencia de la difusión colisional en las propiedades no locales y no Markovianas del transporte.”*** Autor: José Ángel Mier Maza, Madrid, Febrero 2008.
- Tesis doctoral ***“Diseño nuclear de un reactor de fusión por confinamiento magnético con envoltura regeneradora líquida de doble refrigerante He/LiPb (DCLL)”***. Autora: Iole Palermo, Madrid, Julio 2014.