

PROYECTO: FUSIÓN NUCLEAR. ¿Una oportunidad de sostenibilidad?

A lo largo de espacio hay energía, y es una cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía.

Nikola Tesla

En este documento que vas a encontrar:

Introducción / Objetivo General de la Unidad / Dónde encuadrar esta actividad en el currículo oficial / Temporalización por sesiones / Evaluación / Referencias /

1. INTRODUCCIÓN

Una de las necesidades de la educación consiste en acercar al alumnado a los problemas de la actualidad con el objetivo de que puedan, en primer lugar, construir un juicio crítico, o al menos asentar sus bases, y, en segundo lugar, postular soluciones al mismo. Con los contenidos y herramientas didácticas aquí planteadas durante las cinco o seis sesiones que se anexan, solo se pretende el primer punto, a saber, otorgar al alumnado de bachillerato un conocimiento más profundo sobre el problema de la sostenibilidad energética, así como indagar algo más en una de las soluciones que propone la comunidad científica, que no la única

Uno de los mayores retos actuales es la sostenibilidad energética. La creciente demanda [1], a consecuencia, tanto del aumento poblacional como del aumento del consumo interno de las sociedades occidentales, conduce a la necesidad de producir mayores cantidades de energía, sin a su vez, acudir en demasía a fuentes de energía cuyo uso provoca negativas consecuencias hacia el medio y la naturaleza. La respuesta no es sencilla ni tampoco común. Desde diferentes organismos estatales y supranacionales se han planteado diversas respuestas, pero lo que está claro es la necesidad de una respuesta

Una de esas respuestas proporcionadas por la comunidad científica cristalizó durante las últimas décadas del siglo pasado y las primeras de este: la fusión nuclear. Estas breves sesiones no pretenden juzgar o no la idoneidad de dicha fuente de energía; tan solo otorgar información acerca de una fuente de energía, que hoy por hoy, ha dado lugar a uno de los proyectos más caros y ambiciosos de la historia de la humanidad: ITER. La puesta en marcha de un prototipo de reactor de fusión nuclear se ha erigido en uno de los mayores proyectos de la historia de la humanidad, tan solo por detrás de otros proyectos como el programa Apolo y del proyecto Manhattan [2]. Tal esfuerzo global, de un consorcio representado por 35 países [3], entre los cuales se incluyen China, Rusia, la Unión Europea o Estados Unidos, remando con un objetivo común, responde a un problema de magnitud global; al cual no podemos dejar de acercarnos, aunque sea, levemente. El alumnado debe conocer los problemas de la actualidad, así como formarse en ellos con vistas a alcanzar un futuro sostenible [4]

2. OBJETIVO GENERAL DE LA UNIDAD DIDÁCTICA

El objetivo general de la Unidad Didáctica consiste en familiarizar al alumnado de segundo de Bachillerato con la fusión nuclear. Para hacerlo, se establecen tres perspectivas y/o bloques conceptuales, de modo que el docente que pretenda emplear el siguiente material, pueda secuenciar cualesquiera de ellos de una forma indistinta, pero, a su vez, correlativa:

- Introducción a la fusión nuclear desde su perspectiva academicista e histórica
- Fusión nuclear en la actualidad. FCM y FCI. Proyecto ITER
- ¿Cuál es la cabida de la fusión nuclear? Sostenibilidad energética

La temporalización de cada uno de los bloques no exige de más de dos o tres sesiones; de modo que puedan implementarse rápidamente, pero, que, a su vez, promuevan un incentivo conceptual al alumnado. Se trata de otorgar al docente material complementario del que pueda disponer y secuenciar, sin que eso le conlleve una demora en otros aspectos del currículo oficial

La Unidad Didáctica se articula siguiendo el orden propio de la lógica de los contenidos. Se comienza por una introducción histórica de los conceptos de fusión y fisión nuclear, para acabar centrándonos en las propuestas actuales de esta última, la fusión nuclear. Finalmente, se enlaza esta producción de energía con el problema de sostenibilidad energética global, fomentando el juicio crítico y la metacognición

3. . ENCUADRE EN EL CURRÍCULO OFICIAL

Los contenidos de fusión y fisión nuclear se encuentran dentro del currículo propuesto para la asignatura de Física en 2º de Bachillerato

Según el Real Decreto por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato 1105/2014 del 26 de diciembre [5] y del Decreto 52/2015 de la Comunidad de Madrid [6] que establece el currículo de Bachillerato para la Comunidad de Madrid, la fusión nuclear se enmarca dentro del bloque 6. *Física del siglo XX*, de la asignatura de Física en 2º de Bachillerato

A su vez, todo ello se especifica dentro de dicho bloque, en los Criterios de Evaluación 14 y 15, así como en los estándares de aprendizaje 14.1, 14.2 y 15.1

14.1 Explica la secuencia de procesos de una reacción en cadena, extrayendo conclusiones acerca de la energía liberada

14.2 Conoce aplicaciones de la energía nuclear como la datación en arqueología y la utilización de isótopos en medicina

15.1 Analiza las ventajas e inconvenientes de la fisión y la fusión nuclear, justificando la conveniencia de su uso

Esto permite pautar y desarrollar los contenidos aquí propuestos en concordancia con la ley educativa presente

4. TEMPORALIZACIÓN POR SESIONES

El desarrollo de las sesiones incluye tanto los contenidos temporalizados, como las herramientas didácticas asociadas para alcanzar el aprendizaje significativo del alumno

Durante la implementación de las sesiones, se parte de un nivel mínimo, dado el curso para el que se enmarca la unidad didáctica, de modo que bastantes de los contenidos básicos son dados por conocidos. En este caso, aquellos conceptos referidos a la estructura interna del átomo, así como de las características de las partículas que lo componen: protones, neutrones y electrones.

Cada sesión está plantada para una duración de unos 50 minutos, si bien su tiempo de aplicación deberá ser fijado exclusivamente por el docente que aplique estos materiales en el aula

SESIÓN 1. FUSIÓN Y FISIÓN NUCLEAR

Se puede afirmar que el comienzo de la disciplina conocida como física nuclear se encuentra en el descubrimiento del núcleo atómico por parte de Rutherford en su famoso experimento de la lámina de oro; si bien, alrededor de una década antes, en 1896, Henri Becquerel, descubrió la radiactividad natural, consecuencia de los procesos de fusión y de fisión nuclear [7].

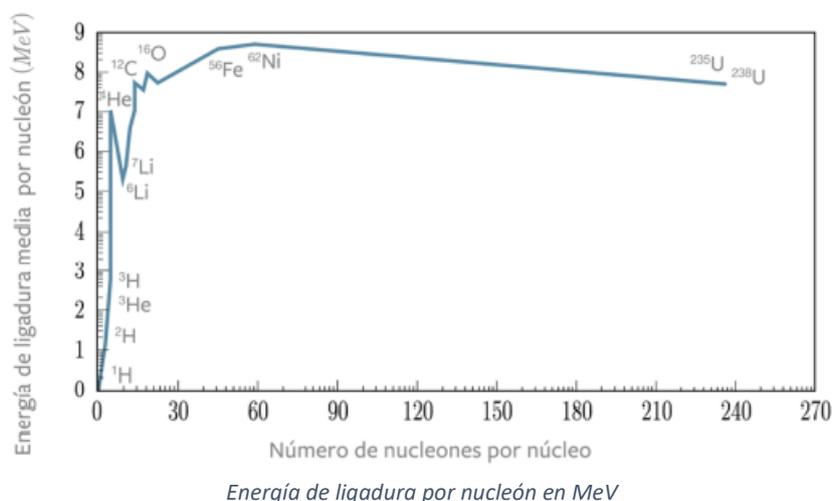


A la izquierda: Imagen de Rutherford en un billete de 100 dólares neozelandeses. A la derecha: Esquema del diseño del experimento de la lámina de oro. De Shutterstock.com

Tras la división del átomo en dos partes diferenciadas por parte de Rutherford, la idea de átomo se fue refinando a lo largo del siglo XX. De igual modo que se introdujo una estructura por niveles en la corteza electrónica del átomo, en 1950, María Goeppert – Mayer y Hans Jensen publican el modelo nuclear por capas. El núcleo de un átomo también se estructura en capas, como lo hacen los electrones en la corteza, de modo que los protones y neutrones que componen el núcleo alcancen estructuras de mayor estabilidad energética.

Para explicar posteriormente los procesos de fusión y fisión nuclear, será importante atender a esta estructura en capas del núcleo, que hace que algunas estructuras concretas de números de neutrones y protones sean más estables que otras. Dicha

estabilidad radica en la cualidad del protón y neutrón como partículas incluidas en el grupo de los fermiones, con espín semientero. La estabilidad de los núcleos atómicos se mide en función de la energía de ligadura por nucleón [partícula que compone el núcleo: protón y neutrón], según se refleja en el siguiente gráfico [8]



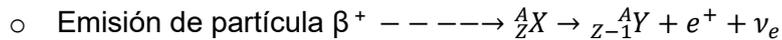
Dentro del núcleo del átomo priman dos interacciones fundamentales. Por un lado, al ser los protones partículas con carga positiva, entre ellos se genera una repulsión de carácter electrostático, que tan solo es apantallada parcialmente por los neutrones (eléctricamente neutros) que se encuentran en el interior del átomo. Por otro, tanto protones como neutrones al ser partículas bariónicas, están sujetas a la fuerza nuclear fuerte. Esta última es la interacción que mantiene unido al núcleo del átomo

El balance entre esas dos interacciones, la electromagnética y la fuerza nuclear fuerte, es aquello que determina los procesos de fusión y de fisión nuclear (en parte, para ser estrictos). La fisión nuclear se produce cuando un núcleo atómico se divide en dos o más núcleos o partículas subatómicas. Por contra, la fusión nuclear sucede cuando dos o más núcleos o partículas subatómicas se unen para conformar un núcleo nuevo de mayor tamaño. El primero suele suceder en núcleos de gran número atómico y la fusión para núcleos más ligeros, pero en ambos casos se busca dar lugar a un núcleo de mayor estabilidad (En otro caso, el proceso seguiría) En los núcleos ligeros, el isótopo más estable suele tener el mismo número de protones y de neutrones, mientras que según aumenta el número atómico del átomo, es necesaria una mayor proporción de neutrones para estabilizarse

Para estabilizarse, los núcleos inestables emiten radiación. La naturaleza y características de las emisiones radiactivas dependen de la interacción fundamental que participe sobre ella y del propio átomo que la origine. Se han catalogado tres tipos diferentes de radiación: α , β y γ .

La radiación α es propia de los procesos de fisión nuclear. En realidad, la radiación α resulta un caso particular de dicho proceso de fisión, donde se emite una partícula α , compuesta por dos protones y dos neutrones sin electrón alguno; por lo que también es denominada núcleo de helio desnudo (^4_2He). La configuración del núcleo de Helio resulta especialmente estable, ya que representa el primer subnivel energético completo para los fermiones, es decir, tanto para los protones como para los neutrones. Eso consigue, que aisladamente, un subgrupo formado por esas cuatro partículas de un núcleo atómico grande puede superar la barrera energética de atracción y ser emitido. La

Al emitir un rayo beta (menos) el isótopo padre gana un puesto en el sistema periódico, manteniendo el número de nucleones

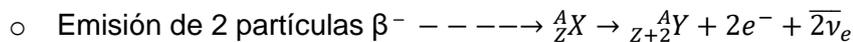


Al emitir un rayo beta (más) el isótopo padre pierde un puesto en el sistema periódico, manteniendo el número de nucleones

La desintegración β^+ resulta, energéticamente hablando, menos beneficiosa que la captura electrónica; un proceso semejante pero no exactamente igual. Por ello, es más probable obtener y medir un proceso de captura electrónica (en especial de los electrones cercanos al núcleo) que mencionada desintegración

- Captura electrónica $-\ - \ - \ - \rightarrow \ p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- Captura electrónica $-\ - \ - \ - \rightarrow \ ^A_ZX + e^- \rightarrow \ ^A_{Z-1}Y + \nu_e$

Finalmente, también es posible observar la desintegración doble β

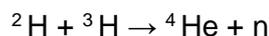


Por último, en núcleos excitados, y si la cantidad de energía es lo suficientemente grande como vencer la atracción de la fuerza nuclear fuerte, el núcleo puede emitir un protón o un neutrón

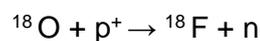
- Emisión de un p^+ $-\ - \ - \ - \rightarrow \ ^A_ZX \rightarrow \ ^{A-1}_{Z-1}Y + p^+$
- Emisión de un n $-\ - \ - \ - \rightarrow \ ^A_ZX \rightarrow \ ^{A-1}_ZX + n$

Todos los procesos nucleares son procesos estocásticos, de modo que tan solo se puede afirmar la probabilidad de que un suceso ocurra, pero no se puede determinar con total certeza si lo hará en un momento concreto

El último proceso es la fusión nuclear, distinta a la fisión. En ella, se genera un núcleo diferente a partir de uno o varios núcleos progenitores. Dos o más nucleidos (o un núcleo y una partícula subatómica) interactúan para formar núcleos diferentes. Entre ellas cabe destacar la reacción que se pretende realizar en los reactores de fusión nuclear



o la de producción del isótopo ^{18}F , trazador radiactivo usado en los procesos de tomografía por emisión de positrones, PET



SESIÓN 2. ENERGÍA EN LA FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEAR

El objetivo de los reactores de fusión nuclear es obtener energía de los procesos nucleares, canalizarla y hacerla productiva para el consumo social. No obstante, no todas las reacciones nucleares generan energía, ya que algunas de ellas, al igual que sucede con las reacciones químicas, pueden tener un carácter endotérmico. En este caso, solo nos interesan aquellas reacciones capaces de liberar grandes cantidades de energía al medio circundante

Para reconocer la energía liberada o necesaria en una reacción nuclear se emplea el concepto de defecto de masa. La energía producida en la reacción se debe a la conversión de la masa en energía; es decir, la masa perdida durante el proceso de la reacción nuclear se transforma en energía a partir de la equivalencia de Einstein

$$Q = [m (\text{productos}) - m (\text{reactivos})] \cdot c^2$$

Donde se entiende por reactivos, la masa de todos los nucleones que conforman los núcleos que reaccionan inicialmente, y como productos la masa de los nucleones que forman los núcleos resultantes

La eficiencia de los reactores nucleares no solo se mide en la energía neta liberada en cada reacción de fusión, Q . También es necesario que la reacción se produzca con la fluidez y en la cantidad adecuadas, lo cual se mide con el factor R . El factor R se define como el número de colisiones o reacciones de fusión por unidad de volumen y unidad de tiempo

$$R = n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma \cdot v$$

Siendo

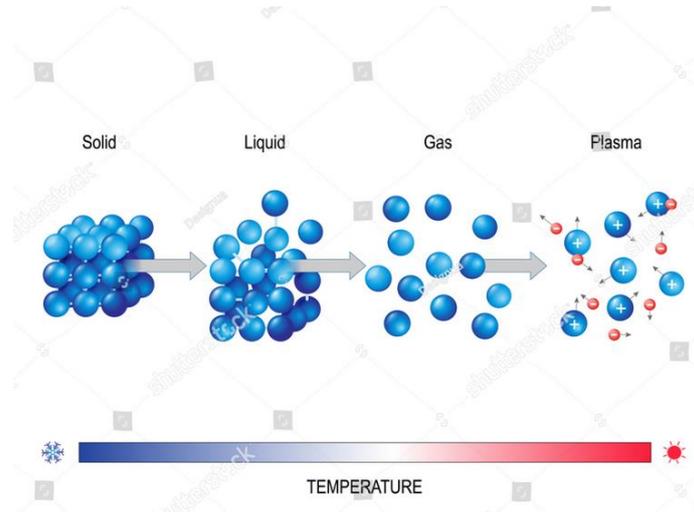
- | | |
|---|--|
| ○ $R \rightarrow$ Tasa de reacción | $[R] = \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| ○ $n_1 \rightarrow$ densidad de partículas incidentes | $[n_1] = \text{cm}^{-3}$ |
| ○ $n_2 \rightarrow$ densidad de partículas en el blanco | $[n_2] = \text{cm}^{-3}$ |
| ○ $\sigma \rightarrow$ La sección eficaz de reacción | $[\sigma] = \text{cm}^2$ |
| ○ $v \rightarrow$ velocidad relativa de las partículas | $[v] = \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ |

Entre todas las variables, quizá la más significativa sea la sección eficaz de colisión, normalmente obtenida conjuntamente con la velocidad. Para una distribución aleatoria de las velocidades, su resolución se basa en complejas ecuaciones, no aplicables a este curso y nivel

Valores apreciables de la tasa de reacción nuclear requiere de muy altas temperaturas. A estas elevadas temperaturas necesarias para que ocurra la fusión nuclear, la materia se encuentra en estado de plasma

El plasma es el conocido como cuarto estado de la materia. Se trata de un estado fluido, similar al estado gaseoso, donde cada una de las partículas que lo constituyen se encuentra cargada eléctricamente. Los átomos neutros que forman el estado gaseoso

se han ionizado a consecuencia de las altas temperaturas, dando lugar a núcleos de carga positiva, y electrones sueltos de carga negativa.



Estados de la materia. De shutterstock.com

Un plasma no tiene volumen definido, al igual que los gases; ni tampoco forma, pero sí presenta características bien diferenciadas, como la existencia de fenómenos colectivos de relevancia, que permiten definirlo como un estado alternativo.

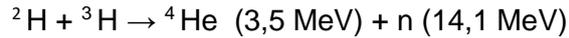
Los plasmas presentan alta conductividad, al estar formados por partículas cargadas. Si bien, dicho alto valor de la conductividad hace que el interior de los plasmas esté apantallado frente a campos eléctricos constantes, pero no frente a campo magnéticos constantes, que sí pueden penetrar en el plasma y mantenerlo confinado a través de sus líneas de campo

Para finalizar la sesión, se plantea la puesta en práctica de las destrezas asociadas al conocimiento teórico previamente definido. En concreto, se pautan un par de pequeños problemas asociados al concepto de defecto de masa y en relación con las principales reacciones nucleares a tener en cuenta

Problema 1. Un aspecto importante de la fusión nuclear es que no se produce de manera espontánea. Esto se debe a que para que dos núcleos puedan fusionarse deben estar muy próximos entre sí, para lo cual han de atravesar la barrera coulombiana que los repele. Para que ocurra la fusión, se necesita que la probabilidad de la fusión aumente. Esto se puede conseguir aumentando la temperatura de la muestra, de modo que, al aumentar la velocidad de los núcleos y la frecuencia de los choques entre éstos, aumente también la probabilidad de fusión de los mismos.

El laboratorio natural en el que estos procesos tienen lugar son las estrellas. Se trata de objetos gaseosos muy masivos. Debido a la contracción del gas producida por la propia atracción gravitatoria, en la estrella va a aumentar enormemente la presión, lo cual, a su vez, va a hacer aumentar la temperatura de la estrella. Cuando la masa es lo suficientemente grande las reacciones de fusión son posibles

Un ejemplo es la reacción incluida en el ciclo del Hidrógeno



- A partir de los datos de las masas de cada núcleo, obténgase la energía liberada en la reacción, y si esta concuerda con la reacción indica anteriormente ¿Qué puede suceder?
- Obténgase la velocidad con la que sale despedida el neutrón, para lo cual debe suponerse condiciones relativistas

Datos: Masa del núcleo de Helio, $m_{\text{He}}=6,640 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
Masa del núcleo de Deuterio, $m_{\text{H}}=3,343 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
Masa del núcleo de Tritio, $m_{\text{H}}=5,006 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
Masa del neutrón, $m_n=1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
Velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
Valor absoluto de la carga del electrón, $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

Problema 2. En estrellas más masivas el proceso dominante es el ciclo CNO. Su nombre proviene de los elementos implicados en las reacciones nucleares que tienen lugar: el Carbono, el Nitrógeno y el Oxígeno. Como resultado del proceso, cuatro protones se fusionan en un núcleo de Helio. Proceso que sigue varios pasos y que tiene al Carbono como catalizador principal.

Un ejemplo de las reacciones que incluye el ciclo CNO es



- A partir de los datos de la masa de cada núcleo, obténgase la energía liberada en la reacción, y si esta concuerda con la reacción indica anteriormente
- Suponiendo que el fotón liberado se llevase consigo el 75 % de la energía implicada en el proceso ¿Cuál sería su longitud de onda?

Datos: Masa del núcleo de Carbono, $m_{\text{C}}=1,992 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$;
Masa del núcleo de Nitrógeno, $m_{\text{N}}=2,159 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$;
Masa del núcleo de H, $m_{\text{H}}=1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;
Velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
Valor absoluto de la carga del electrón, $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
Constante de Planck, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

SESIÓN 3. FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO. ITER

La obtención de energía a través de la fusión a escala comercial exige que el sistema sea rentable desde el punto de vista energético, para lo cual, la energía liberada por las reacciones de fusión nuclear debe ser, al menos, del orden de 10 veces mayor que la energía necesaria para calentar y confinar el plasma [9].

Calentar y confinar el plasma son dos de los requisitos necesarios para que sea efectiva la reacción. No obstante, dada la tecnología actual, no es nada fácil llegar a los límites necesarios para hacerlo. El criterio de Lawson [8], establece el valor mínimo para que la reacción acontecida en el reactor nuclear sea estable en función, únicamente, de la temperatura (T), el tiempo de confinamiento del plasma (τ) y la densidad del plasma (n).

Por tanto, para alcanzar un sistema en funcionamiento autosostenido, se debe jugar con las tres variables mencionadas, de modo que, en el caso del material de ignición empleado en fusión (Deuterio – Tritio), su producto sea mayor de $3 \cdot 10^{21} \text{ KeV}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$. Esto se puede conseguir por:

- Confinamiento gravitatorio. Se emplea la fuerza de la gravedad para confinar el plasma a altas densidades y durante altos tiempos de confinamiento. Pero no es reproducible a nivel terrestre
- Confinamiento magnético. Se confina el plasma mediante campos magnéticos. Se trata de un plasma de baja densidad y a altas temperaturas, con largos tiempos de confinamiento. Existen dos posibilidades actualmente: los tokamaks y los sterellators
- Confinamiento inercial. Se comprime una diminuta cápsula de combustible (Deuterio – Tritio), mediante láseres de gran potencia. Con ello se alcanzan altas densidades durante cortos tiempos de confinamiento. El proceso de ignición puede ser directo, indirecto o mediante Z – pinch

Durante esta breve sesión tan solo nos acercaremos al estudio del plasma por confinamiento magnético. Se trata de confinar el plasma caliente por medio de campos magnéticos helicoidales (resultado de combinar campos magnéticos poloidales y toroidales), al estar formado el plasma por partículas cargadas. Si bien existen dos formas de crear los campos helicoidales, en este caso, exclusivamente nos centraremos en los tokamaks; ya que el organismo internacional de referencia en reactores de fusión nuclear, ITER, emplea esta tecnología.



Campos magnéticos en el tokamak [8]

No obstante, se debe mencionar que existen multitud de reactores nucleares a menor escala que se fundamentan tanto en los principios de los stellarators como del confinamiento inercial, aunque no nos detengamos en ellos

El proyecto ITER (Acrónimo de International Tokamak Experimental Reactor o bien también la traducción de *camino* en latín) consiste en el mayor proyecto actual para la formación de un reactor nuclear de fusión. Su puesta en marcha está programada hasta el año 2035 [2] conformada por un consorcio de 35 países, que incluye a la Unión Europea, China, Rusia y Estados Unidos entre otros miembros. ITER pretende demostrar la viabilidad de los reactores de fusión por confinamiento magnético empleando para ello la configuración de un tokamak

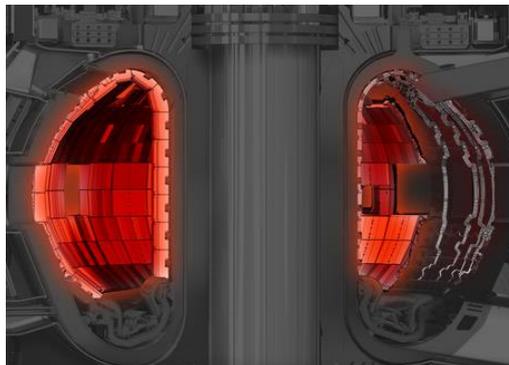
Los principales sistemas del tokamak son [10]:

- **Vasija de vacío.** Se trata de la vasija del reactor que contiene al plasma confinado. Está herméticamente cerrada y en condiciones de vacío, de modo que supone la primera barrera de seguridad frente a la posible fuga de partículas radiactivas



Vasija de vacío. De www.iter.org/mach

- **Manto reproductor.** El manto reproductor aísla la vasija de vacío de los neutrones de alta energía producidos durante las reacciones de fusión. Su propósito además incluye el ser el generador del tritio de la reacción. Si bien el deuterio es un elemento abundante en la naturaleza, el tritio no lo es; de modo que es necesario producirlo en el propio reactor. Gracias a su envoltura de litio, los neutrones de alta energía que colisionen con el manto podrán generar tritio en una nueva reacción que conduzca a la regeneración del combustible necesario en la reacción nuclear.

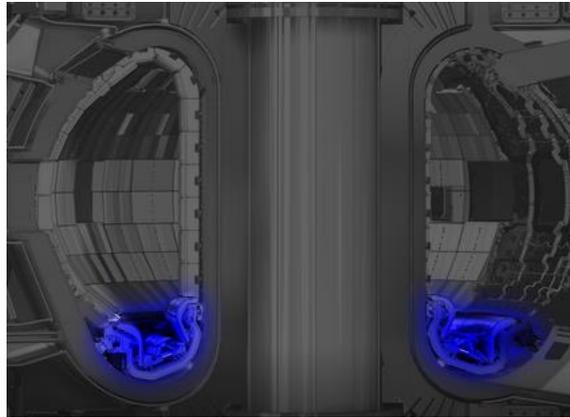


Manto reproductor. De www.iter.org/mach

El manto debe estar constituido por un material resistente a las altas temperaturas y con baja probabilidad de activación. Debe ser capaz de soportar decenas de miles de grados, así como verse afectado mínimamente por la transmutación de materiales que lo componen a consecuencia del impacto de los neutrones energéticos producidos durante la reacción. La composición del manto reproductor constituye una de las principales líneas de investigación actuales, con grupos de investigación también en España [11]

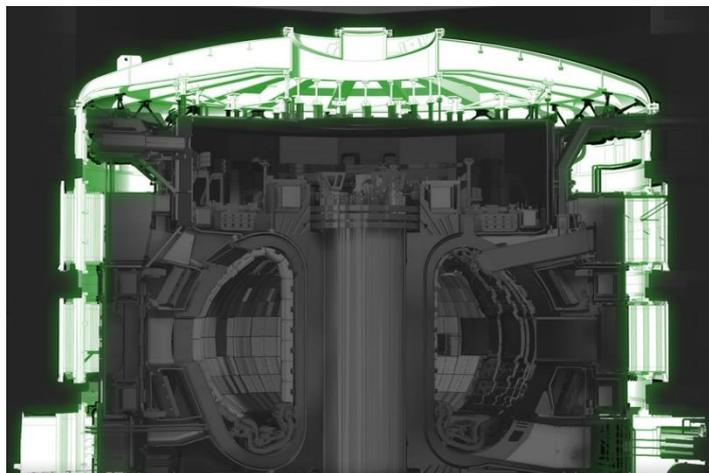
Por último, indicar que el tritio es un elemento radiactivo. Esta configuración permite que el tritio no salga en ningún caso del propio reactor, minimizando los posibles peligros de residuos nucleares.

- **Divertor.** Posicionados en el fondo de la vasija de vacío, tiene como misión recoger las diversas partículas resultantes de la reacción o la interacción con el manto. Estas partículas son dirigidas hacia el divertor valiéndose de campos magnéticos y de su superior masa con respecto al tritio y al deuterio.



Divertor. De www.iter.org/mach

- **Criostato.** El tokamak está envuelto de un criostato que permite aislarlo y mantener las condiciones de superconductividad de las bobinas generadoras de los campos magnéticos. El criostato contiene en su interior helio líquido a 4 K



Criostato. De www.iter.org/mach

Para finalizar la sesión y aumentar el conocimiento acerca del proyecto ITER y del funcionamiento del tokamak, los alumnos **deberán “manipular” un tokamak gracias a la app de simulación** promovida desde Fusenet [Organismo Internacional para la difusión de la Fusión Nuclear] [12]

La aplicación, disponible tanto para Android como para Iphone, permite manipular la potencia generada en el tokamak junto al campo magnético, de tal modo que el plasma confinado en el campo magnético no se perturbe hasta acabar por deteriorar por completo el manto reproductor



*A la izquierda: Interfaz inicial de la aplicación. Presenta la posibilidad de varios niveles de dificultad
A la derecha: momento puntual de la generación del plasma. De la app de tokamak*

La aplicación permite al alumnado familiarizarse con los elementos más importantes de un tokamak, a la vez que introduce algunos términos no tratados en la sesión como es la inyección de microondas. El uso de microondas se emplea para suprimir las islas magnéticas, inestabilidades sufridas por el plasma y que deben ser depuradas.



Aplicación de microondas sobre las inestabilidades del plasma. De la app de tokamak

De este modo, el alumnado puede indagar más en la fusión por confinamiento magnético a partir de un modo entretenido y divulgativo, que potencie el uso de las herramientas tecnológicas de aplicación al campo educativo

SESIONES 4 Y 5. SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA ¿TIENE CABIDA LA FUSIÓN NUCLEAR?

Las últimas sesiones pretenden no solo informar sino generar juicio crítico sobre uno de los grandes problemas que nos abordan en la actualidad: la sostenibilidad energética

La demanda energética es cada vez mayor [1], existiendo la previsión de doblar la demanda para el año 2050. Si a ese aumento de la necesidad de generar más energía, se le une el Acuerdo de París [13], donde se propone la reducción anual del 6 % en el uso de combustibles fósiles, se hace necesario la apuesta por otro tipo de fuentes de energía. La solución se encuentra en las energías renovables y en la fusión nuclear. ¿por cuál apostar?

La solución no es ni unívoca ni excluyente. Su búsqueda debe ser justificada por cada individuo de la sociedad en base a los fundamentos propios de la ciencia, la economía y la sostenibilidad. En ese punto es dónde se adscriben estas sesiones y el trabajo enfocado en ellos

¿En qué consiste el trabajo pautado para estas sesiones?

A partir de los datos recopilados a nivel mundial acerca del consumo de fuentes de energía, sus tipos y la demanda, los alumnos deben exponer y justificar el uso de diferentes fuentes de energía, aludiendo a la justificación de su uso en el pasado, las características de su demanda presente, y las posibilidades de futuro que ofrece. Trabajando y realizando una escucha activa del resto de grupos se pretende desarrollar la reflexión sobre problemáticas de gran impacto social

La actividad propuesta para las sesiones es la siguiente:

- En grupos pequeños de 5 alumnos
- Los alumnos deberán elaborar argumentaciones (tanto de aumento de producción como de disminución o cierre completo) sobre la necesidad de producción de las diversas fuentes de energía
- Cada grupo defenderá, a elección por sorteo, una fuente de energía:
 - Energía nuclear de fusión
 - Energía nuclear de fisión
 - Energía procedente de combustibles fósiles
 - Energías renovables I: eólica, maremotriz e hidráulica
 - Energías renovables II: solar, geotérmica y biomasa
- La defensa de las fuentes de energía es en formato libre: exposición, power-point,... a elección del grupo
- La exposición se realizará frente al resto de la clase, donde, será especialmente relevante, **el análisis gráfico**
- Para la defensa dispondrán de un límite máximo de tiempo de 10 minutos, ampliable a 15 minutos por la posibilidad de generar un pequeño debate
- La exposición y puesta en práctica de las defensas será evaluada mediante rúbricas (Apartado 5. Evaluación)

El docente ayudará a los alumnos en la búsqueda de la información, aportando algunas webs de libre disposición donde encontrar información relevante, que obviamente, podrá ser complementada a partir de fuentes de información aceptadas desde el punto de vista científico

Algunas de las webs de las que obtener información son las siguientes:

- Web de la red eléctrica española

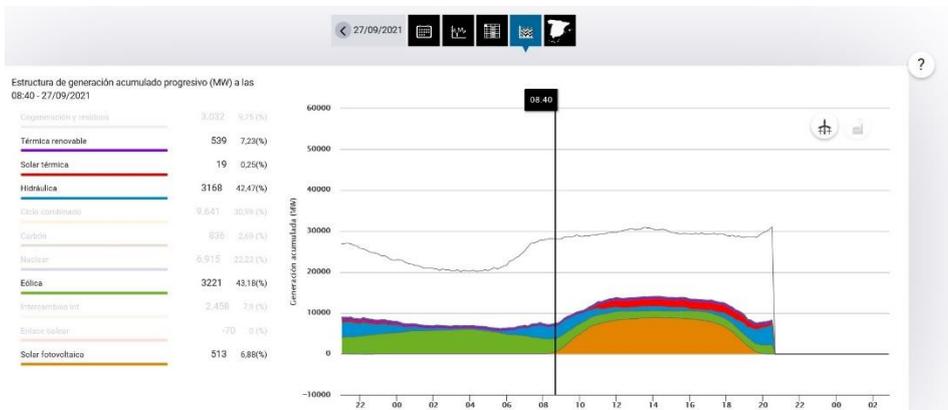
<https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demanda/total>



Demanda a tiempo real de energía en la Península Ibérica. De la web de la ree

La interfaz permite observar a tiempo real tanto la previsión de demanda energética como la demanda real. Combinado con la aportación de cada una de las fuentes de energía y el CO₂ asociado

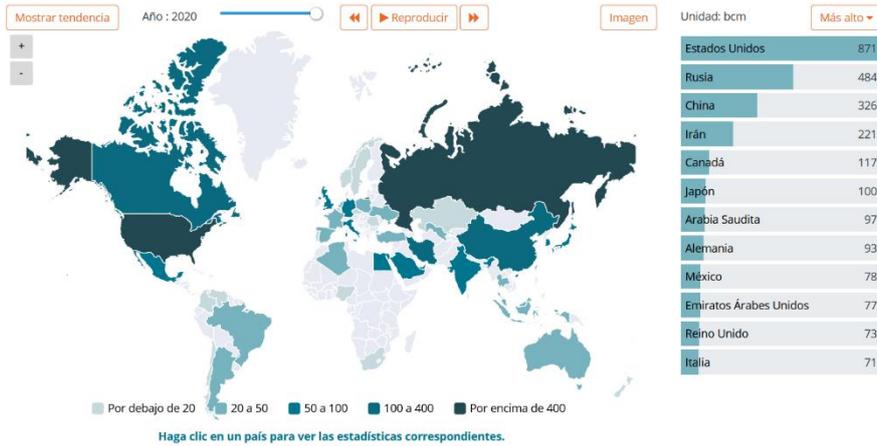
También permite discriminar el porcentaje de uso de cualquier tipo de energía en un tiempo real concreto



Porcentaje de uso de energías renovables. De la web de la ree

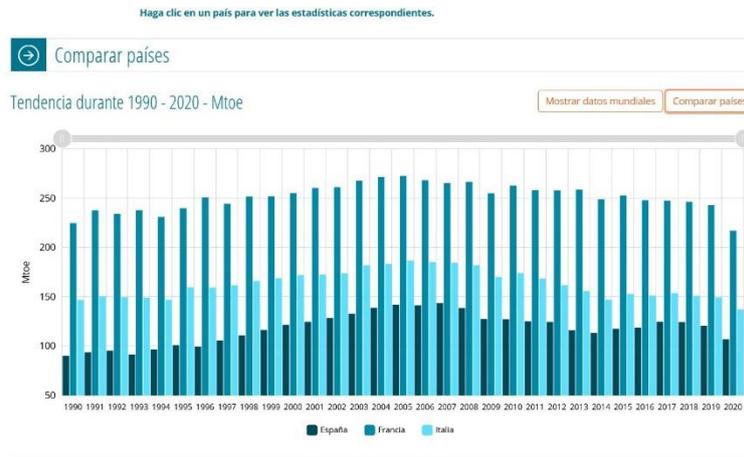
- Web de enerdata <https://datos.enerdata.net/>

En esta web se encuentran mapas interactivos sobre los datos de consumo por fuentes de energía de diferentes países. Es posible seleccionar periodos flexibles desde 1990 hasta 2020, incluyendo la evolución de los mismos. Además de mapas, los datos también son accesibles por otras vías como los diagramas de barras.



Mapa del consumo global de gas natural en 2020. De la web de la enerdata

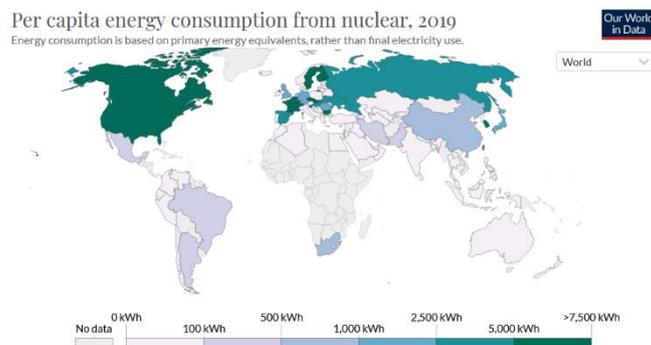
La web también permite realizar una comparativa de consumo o producción entre países



Comparativa del consumo global entre España, Italia y Francia. De la web de la enerdata

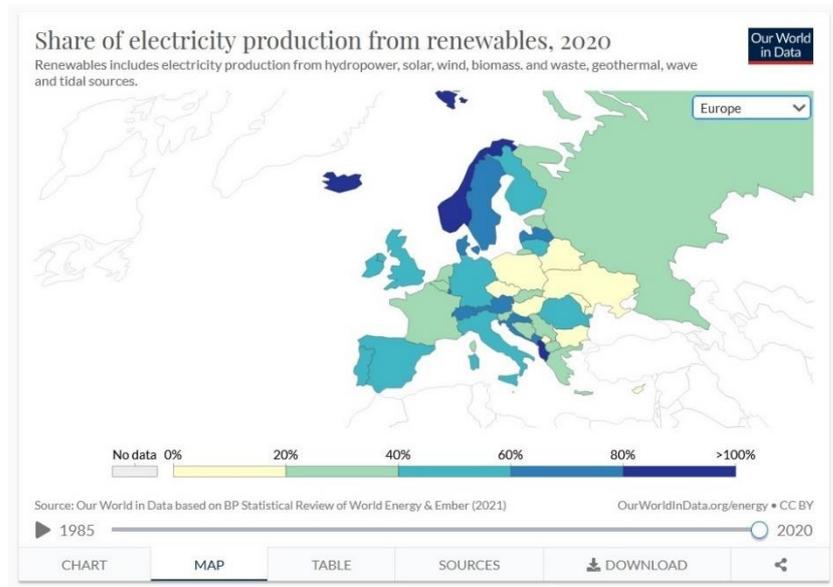
- [Web de ourworldindata](https://ourworldindata.org/grapher) <https://ourworldindata.org/grapher>

Podrás encontrar mapas interactivos sobre el consumo de diferentes fuentes de energía a nivel global o por regiones



Consumo mundial de energía nuclear de fisión. De la web de la ourworldindata

Permite discriminar entre multitud de fuentes de energía, así como obtener datos globales y variaciones porcentuales en el consumo de diferentes tipos de energía



Variación porcentual del uso de energías renovables. De la web de la ourworldindata

5. EVALUACIÓN

La Unidad Didáctica desarrollada se encuentra dentro del bloque de contenidos de Física Moderna, de modo, que deberá ser evaluada mediante las pruebas consensuadas por el departamento de Física y Química para este bloque de contenidos.

De este modo, los contenidos referidos a las primeras sesiones, los cuales constituyen contenidos ordinarios sumados a contenidos de profundización no requieren de herramientas de evaluación distintas a las establecidas en las programaciones de cada uno de los departamentos. Muchas de las actividades pautadas, como el simulador, no se verán evaluadas; ya que solo pretenden acercar el conocimiento al alumnado desde una visión más divulgativa que académica.

El trabajo de exposición, propuesto para las sesiones finales, sí que requiere de un método de evaluación distinto. Para ello se adjunta a continuación una rúbrica de exposición que contiene los principales ítems a valorar por el docente. Esta herramienta puede ser empleada por el docente, o bien adaptada según su necesidad. Tan solo constituye un borrador orientativo a uso según la conveniencia del docente que palpa su aula desde dentro.

La rúbrica valora aspectos expositivos, como la dicción o la postura gestual, combinada con aspectos argumentativos y de búsqueda de información ajustada al discurso a defender.

En la rúbrica, cada categoría puntuará dos puntos sobre la nota final. A su vez, dentro de cada categoría, la puntuación aumentará en 0,5 puntos por cada nivel asignado.

RÚBRICA PARA EVALUAR: DEFENSA Y EXPOSICIÓN ORAL

Alumno:

Calificación Final:

CATEGORÍA	4	3	2	1	TOTAL
<u>Creatividad y Dicción</u>	La presentación es creativa, hablando y exponiendo pausada y claramente	Pronuncia correctamente, siendo la presentación y defensa correctas	Establece una correcta presentación, pero se traba ligeramente al hablar o al seguir el hilo del diálogo	No se le entiende correctamente, con continuas interrupciones. El discurso no es fluido ni creativo	
<u>Postura gestual y puesta en escena</u>	La puesta en escena y la posición del cuerpo es la adecuada. El ponente domina la escena	El ponente domina la escena, pero, en ocasiones, no alude lo suficiente a la presentación. No existe una concordancia plena	La posición del ponente es la adecuada sin dominar la escena, siendo la presentación repetitiva por momentos	El discurso y la presentación no concuerdan. El ponente se esconde, sin dominar la escena	
<u>Contenido y comprensión</u>	Comprende la temática, responde a las cuestiones planteadas. Argumenta las ideas durante el discurso	Comprende la temática en su mayor parte. El contenido está bien hilado y elaborado, solo en su mayor parte	Comprende parcialmente el contenido expuesto. No está bien hilado con la presentación. Presenta algunas dificultades al responder a las cuestiones	No comprende el contenido. Presenta fuertes dificultades para responder a las cuestiones planteadas	
<u>Límite-tiempo</u>	Tiempo ajustado al previsto, con un final que retoma las ideas principales y redondea la exposición	Tiempo ajustado al previsto, pero con un final precipitado o alargado por falta de control	No ajusta al tiempo. Excesivamente corto	Excesivamente largo o insuficiente para desarrollar correctamente el tema	
<u>Búsqueda de información</u>	Realiza una búsqueda de información ajustada al discurso. Cita las fuentes	Realiza una contrastada búsqueda de información, que, en ocasiones, no cita	En algunas ocasiones las citas o fuentes de información empleadas son de dudosa certeza científica	No recurre a fuentes de información ajustadas a criterios científicos.	

6. REFERENCIAS Y PÁGINAS WEB

- [1] World Businnes Council for Sustainable Development (2004). Hechos y tendencias hacia el año 2050. Energía y cambio climático
- [2] Wikipedia. Proyecto ITER. <https://es.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [3] Página web del ITER. <https://www.iter.org/proj/Countries>
- [4] Organización de Naciones Unidas para la Educación de la Ciencia y la Cultura. UNESCO (2017) Educación para los objetivos de desarrollo sostenible
- [5] Boletín oficial del Estado (2015). Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato
- [6] Boletín oficial de la Comunidad de Madrid (2015). Decreto 52/2015, de 21 de mayo, del Consejo de Gobierno, por el que se establece para la Comunidad de Madrid el currículo del Bachillerato.
- [7] Mataix, Mariano. *De Bequerel a Oppenheimer. Historia de la energía nuclear*. Senda Editorial S.A., 1988
- [8] Fernández – Cosials, F. y Barbas Espa, A. *Curso básico de Física nuclear* (2017)
- [9] R. Betti et al., Phys. Rev. Lett. 98, 155001 (2007)
- [10] Página web de ITER <https://www.iter.org/mach>
- [11] Página web de FuseNet <https://fusenet.eu/member/university-carlos-iii-madrid>
- [12] Página web de FuseNet <https://fusenet.eu/>
- [13] Boletín Oficial del Estado (2017). Instrumento de ratificación del Acuerdo de París, hecho en París el 12 de diciembre de 2015.