

FUSIÓN NUCLEAR

LA ENERGÍA DE LAS ESTRELLAS QUE PODRÍA SALVAR AL MUNDO

En las últimas décadas la población mundial y el consumo de energía eléctrica han ido en aumento lo que hace necesario generar cada vez más energía para satisfacer las necesidades humanas. La mayor parte de ésta se obtiene de la quema de combustibles fósiles, los protagonistas del calentamiento global. Así, es urgente encontrar una fuente energética con menor impacto ambiental que los reemplace, como la fusión nuclear. ¿El problema? Provocar esta reacción requiere más energía que la que libera posteriormente. En este artículo se revisa el proyecto ITER en el que 35 países colaboran para probar su viabilidad.

Palabras clave: fusión nuclear, ITER, reactores.

POR SEBASTIÁN OJEDA G.

A lo largo del tiempo, el ser humano se ha hecho cada vez más dependiente de la energía eléctrica, siendo difícil en la actualidad pensar en la vida sin iluminación, calefacción, refrigeración o transporte. Así también lo muestran las cifras, donde el consumo ha aumentado en el último medio siglo y se prevé que su demanda continúe creciendo. Según datos de la IEA (Agencia Internacional de Energía por sus siglas en inglés), entre la década de los 70 y el año 2017 el consumo de energía eléctrica creció en más del 400%, además de presentar un incremento del 2,6% respecto al año 2016, lo que demuestra que la demanda por este recurso aumenta a pasos agigantados (IEA, s.f.).

“En las próximas décadas, la demanda de energía aumentará a niveles cada vez mayores a medida que crezcan las economías y las poblaciones. Esto ejercerá presión sobre el sistema de suministro y requerirá que se ponga énfasis en el uso eficiente de la energía” (National Petroleum Council, 2007). La proposición da cuenta de lo que se pronostica para la demanda energética, haciendo evidente la

necesidad de encontrar alternativas o una combinación de ellas que sea capaz de aumentar la producción, para satisfacer los requerimientos futuros de la sociedad.

Para hacer frente al problema, una apuesta sería multiplicar las plantas de producción de energías como el petróleo crudo o el carbón, que son las más habituales. Sin embargo, éstas ponen en juego un segundo factor relevante en la discusión: el medio ambiente. Las emisiones globales de gases de efecto invernadero han crecido desde los tiempos preindustriales, mostrando un aumento cercano al 70% en 40 años. Sumado a esto, los combustibles fósiles -principales causantes de la emisión de gases de efecto invernadero- predominan en la producción energética y se espera que sigan haciéndolo hasta 2030, lo que tendría como resultado un crecimiento de las emisiones de CO₂ 40 y un 110% en el período 2000-2030 (IPCC, 2007).

También han entendido como un problema el uso intensivo de dichas energías las organizaciones a lo largo y ancho del

globo, como la Fusion For Energy (F4E) de la Unión Europea, que prevé que el aumento más grande en la demanda energética vendrá de países en desarrollo, donde la rápida urbanización hará necesaria la generación de electricidad a gran escala. Por lo mismo, en atención a los requerimientos medioambientales de fuentes con bajas o nulas emisiones de CO₂ y la necesidad de invertir en una combinación energética sostenible, el organismo plantea que deben desarrollarse fuentes energéticas limpias (F4E, s.f.) para no dañar evitar que la situación se vuelva crítica.

Por otra parte, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) menciona que el cambio climático está en relación directa con la salud humana, donde el uso de energía refleja parte del uso de recursos y materiales que contribuyen con dicho cambio, perjudicándonos indirectamente. En 2018 la población mundial era cercana a los 7.500 millones de personas y se

ha proyectado que para 2050 sea de casi 10.000 millones, subiendo a 11.000 millones para el 2100. Este crecimiento va de la mano con un considerable aumento de la demanda de recursos como alimentos, agua y, por cierto, energía.

Es importante considerar que se estima que el aumento del consumo de energía será de hasta un 63% al 2040. Esto, sumado a la gran cantidad de países que depende de energías fósiles, impedirá controlar de la temperatura global, lo que tendría como resultado que para 2050 nuestro planeta no sea capaz de mantener de forma sostenible a 10.000 millones de personas, debido al cambio climático. De ahí la importancia de cambiar la forma en que producimos energía para evitar contribuir con el cambio climático, la contaminación atmosférica y de los océanos o la pérdida de diversidad biológica, entre otros (ONU, 2019). La humanidad se enfrenta a una crisis energética mundial, por lo que es necesario

El equipo de EUROfusion elaboró un plasma de alto confinamiento sostenido por primera vez en el tokamak JET utilizando los mismos materiales de pared y mezcla de combustible que usará ITER.

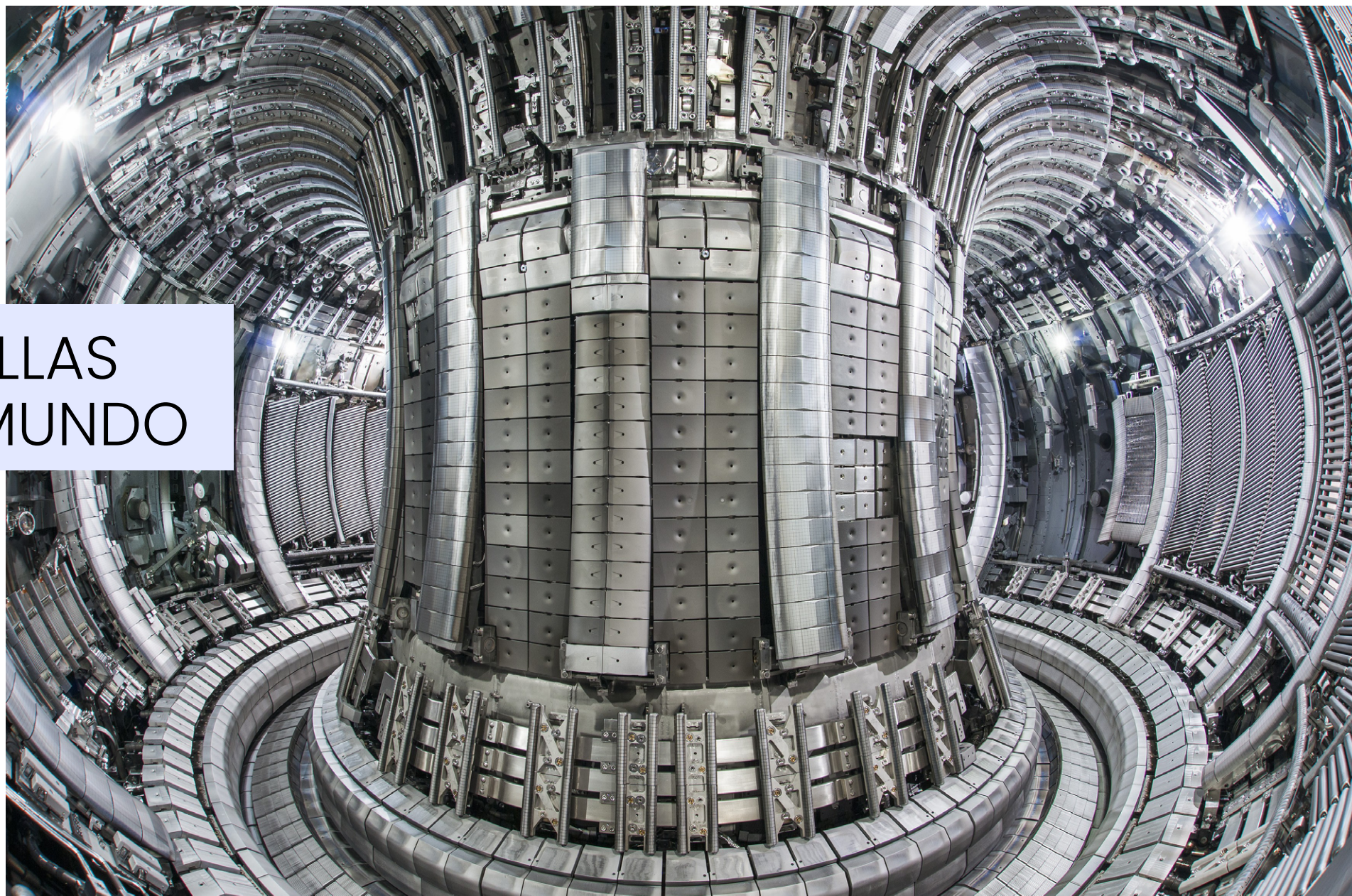
explorar soluciones para probar su utilidad y ponerlas en marcha antes de que la situación sea crítica. La fusión nuclear podría ser una de ellas o, al menos, parte de ésta.

Al observar nuestro entorno tenemos a simple vista fuentes de energía prácticamente inagotables: las estrellas y el sol. Las estrellas brillan debido a la energía que liberan gracias a la fusión nuclear de los átomos. Se trata de un proceso eficiente y limpio, que produce energía en grandes cantidades y que tiene una magnitud de miles de millones de veces más que lo que necesitamos en la Tierra. Entonces, ¿por qué no crear un pequeño sol en la Tierra? Si bien es posible, lograrlo es complicado ya que existen dificultades y limitaciones tecnológicas.

Para hacer frente a estos obstáculos es preciso trabajar e investigar. Eso es lo que hoy está haciendo ITER, un proyecto que tiene su base operacional en la ciudad de

Cadarache, Francia. En él participan más de 30 países y persiguen un único fin: probar la viabilidad de la fusión nuclear como fuente energética sostenible y escalable a niveles masivos.

Este artículo busca realizar una revisión de la fusión nuclear y el proyecto ITER para conocer en qué medida podría contribuir a solucionar el problema energético mundial. En las siguientes páginas se realizará un repaso por los conceptos relacionados a la fusión nuclear, se presentará como posible fuente energética viable y, finalmente, se comparará con otras alternativas energéticas actuales.



REACCIONES NUCLEARES

La reacción nuclear es definida como la interacción entre dos nucleidos¹ (o un nucleido y una partícula subatómica) que forman otros nucleidos distintos a los iniciales. Un ejemplo es la fusión de deuterio y tritio², que tiene como resultado un núcleo de helio y un neutrón (Oliva, E., 2017). Cuando la masa de los nucleidos iniciales difiere de la masa de los nucleidos resultantes, considerando la equivalencia masa-energía³; y en el caso de que la masa inicial sea mayor a la final, la energía inicial también será mayor a la final, por lo que se liberará energía. En el caso contrario, requerirá energía para producirse (Oliva, E., 2017). En física nuclear, esto corresponde a la energía cinética y la energía interna de las partículas.

Ciertos elementos químicos como el uranio y el plutonio son naturalmente inestables. Cuando el núcleo de alguno es impactado por un neutrón, absorbiéndolo, el núcleo se puede dividir o fisionar, liberando dos o tres neutrones y energía. La masa total de los productos es ligeramente menor a la masa original más la del neutrón impactante, diferencia que se debe a que parte de la masa se convirtió en energía de acuerdo a la famosa fórmula de Einstein⁴ (OECD, 2003). De esta forma, la masa total del núcleo siempre será menor que la suma de las masas de sus nucleones⁵.

Debido a que la masa es una medida de energía, la energía total del núcleo es menor que la energía combinada de los nucleones separados. Esta diferencia de energía se denomina energía de enlace del núcleo y puede entenderse como aquella que debe agregarse a un núcleo para separarlo en sus componentes (Serway, R., 2005).

La energía de enlace de núcleos ligeros (número de masa menor a 20) es mucho menor que la energía de enlace de núcleos pesados. Esto permite la existencia de un proceso inverso a la fisión, al que llamamos fusión nuclear, esto es, cuando dos núcleos ligeros se unen en uno más pesado y liberan energía debido a la diferencia de masas entre los núcleos iniciales y el resultante (Serway, R., 2005).

¹ Llamamos nucleido a cada una de las formas en que puede agruparse un grupo de protones y neutrones, es decir, a las configuraciones que puede tener el núcleo atómico con distintas cantidades de estas partículas (Oliva, E., 2017).

² Dos átomos de un mismo elemento siempre tienen igual cantidad de protones, pero pueden diferir en su número de neutrones, a estos átomos los llamamos isótopos. Por ejemplo, el hidrógeno posee tres isótopos, con 0, 1 y 2 neutrones a los que llamamos hidrógeno, deuterio y tritio, respectivamente (Chang, R., 1999).

³ En 1905 Albert Einstein notó que cuando un cuerpo cede energía, su masa disminuye proporcionalmente. Gracias a esto fue posible determinar que la masa corresponde a una forma de energía.

⁴ La ecuación $E=mc^2$ expresa que tanto la energía (E) como la masa (m) de un cuerpo en reposo pueden transformarse la una en la otra utilizando a la velocidad de la luz al cuadrado (c^2) como factor de proporcionalidad.

⁵ A cada una de las partículas subatómicas que componen el núcleo atómico se les llama nucleón, es decir, nucleón es una palabra usada para agrupar tanto a protones como neutrones bajo un nombre en común.

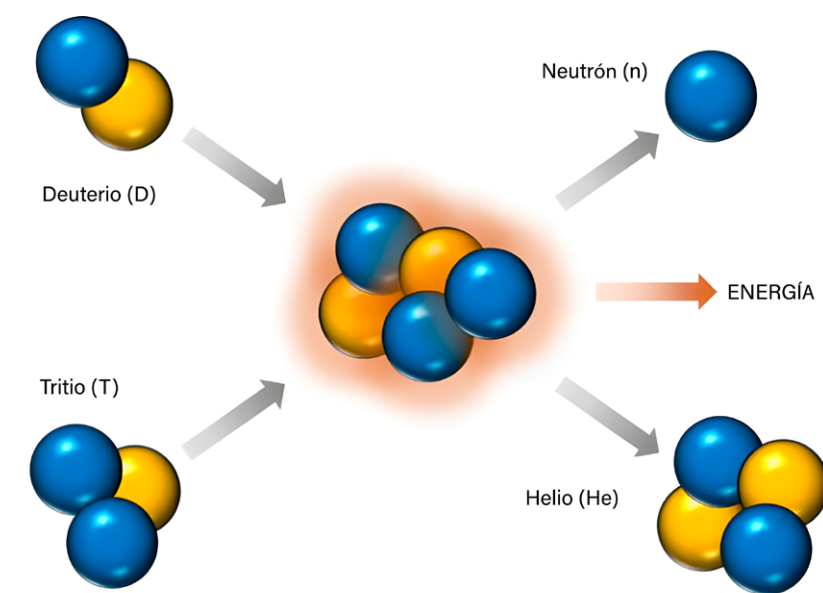
Para que se produzca esta reacción los nucleones deben estar suficientemente próximos para ser unidos por la fuerza nuclear fuerte⁶. Sin embargo, ambos tienen carga positiva y se repelen. Para evitar que esto ocurra, los nucleones deben poseer una enorme cantidad de energía cinética, de modo que logren acercarse y provocar la reacción (Oliva, E., 2017).

Esta cantidad de energía puede conseguirse calentando el combustible a temperaturas 17 mil veces más altas que la temperatura del sol (Serway, R., 2005). A esta temperatura, la materia se encuentra en estado de plasma⁷ que a pesar de no ser gas, tiene un comportamiento similar.

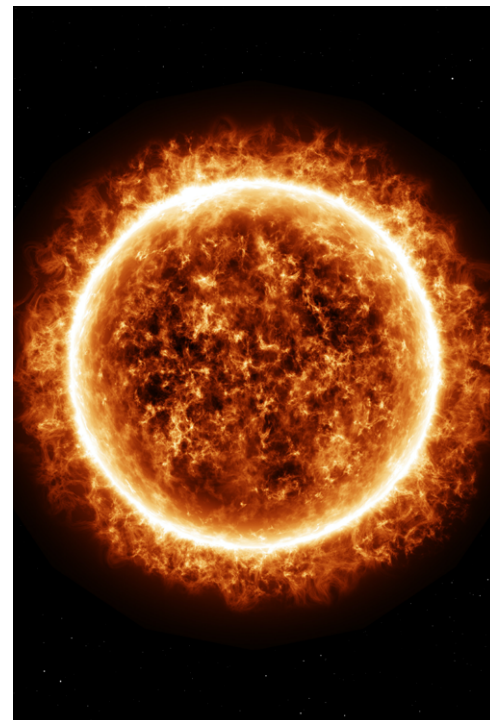
Una de sus similitudes es que cuando se calienta, comienza a expandirse. Esto es un problema si lo que se quiere es obtener una fusión, ya que al dispersarse disminuyen las probabilidades de que los nucleidos se acerquen. Una manera de impedirlo es confinar el plasma (Oliva, E., 2017) en una estructura o dispositivo que lo contenga y que le entregue las condiciones necesarias para la reacción. Es decir, se necesita un reactor nuclear.

⁶ Dos cargas de igual signo se repelen y dos cargas de distinto signo se atraen, a esto lo llamaremos fuerzas de repulsión y atracción de Coulomb. Sin embargo, los protones del núcleo no se repelen entre sí, esto se debe a la existencia de la fuerza nuclear fuerte, que a muy cortas distancias predomina por sobre la fuerza de repulsión, provocando que protones y neutrones se atraigan, haciendo al núcleo estable (Serway, R., 2005).

⁷ Más del 99% de la materia visible en el universo se encuentra en estado de plasma, que se alcanza cuando la materia está a temperaturas sobre los 10 mil grados Celsius (INFIP, s.f.). Allí se produce la ionización, donde los átomos se despojan de sus electrones, formando un cúmulo de núcleos y electrones libres (Serway, R., 2005).



Reacción de fusión entre deuterio y tritio.



La superficie del sol se encuentra a más de 5.500 grados Celsius. A esta temperatura, los átomos que lo componen están en estado de plasma.



Central nuclear en Bélgica.

REACTORES NUCLEARES

Un reactor de fusión nuclear debe proporcionar una temperatura precisa para que se produzcan las reacciones de fusión y garantizar un número de núcleos (o densidad de plasma) suficiente para asegurar una alta probabilidad de colisión de las partículas. Estas condiciones de temperatura y densidad deben mantenerse por un tiempo para que ocurran las reacciones de fusión nuclear y se obtenga una ganancia neta de energía, es decir, que el funcionamiento del reactor proporcione más energía de la que se le debe entregar para iniciar la reacción.

De este modo, se entiende como un reactor nuclear de fusión un sistema en el que se dan las condiciones necesarias de temperatura y densidad del plasma para efectuar la reacción, donde es muy importante el tiempo en el que mantengan estas condiciones (Oliva, E., 2017).

Existe una temperatura mínima para que el reactor logre su funcionamiento autosostenido: la temperatura de ignición crítica, que es muy relevante para el confinamiento o la contención del plasma en el interior del reactor.

A su vez, se denomina tiempo de confinamiento al período en que se logra mantener el plasma por sobre la temperatura de ignición crítica, lo que es fundamental para obtener una ganancia neta de energía. Esto es que para producir más energía que la utilizada en calentar el plasma, existe un tiempo determinado de confinamiento mínimo. Incluso teniendo la temperatura suficiente es necesario mantener una suficiente densidad en el plasma para garantizar una probabilidad de colisión mínima (Oliva, E., 2017).

Aunque ya se han alcanzado las densidades mínimas del plasma, es más difícil solucionar el problema del tiempo

de confinamiento. ¿Es posible confinar un plasma a temperaturas 17 mil veces más altas que la del sol sin que el contenedor se funda? Una de las técnicas básicas es el confinamiento en un campo magnético (Serway, R., 2005), que modifica la trayectoria de las partículas cargadas y las mantiene en el interior del sistema.

Debido a las fuerzas electromagnéticas implicadas, no es suficiente un campo magnético para confinar el plasma, se necesita utilizar otro adicional para contenerlo. Una opción usada actualmente es generar parte del campo magnético por corrientes eléctricas que circulan por el mismo plasma (Moral, N., 2017). A este diseño se le denomina tokamak (ver imagen 2) y es el que se utiliza para uno de los proyectos científicos internacionales más ambiciosos de la actualidad, ITER.

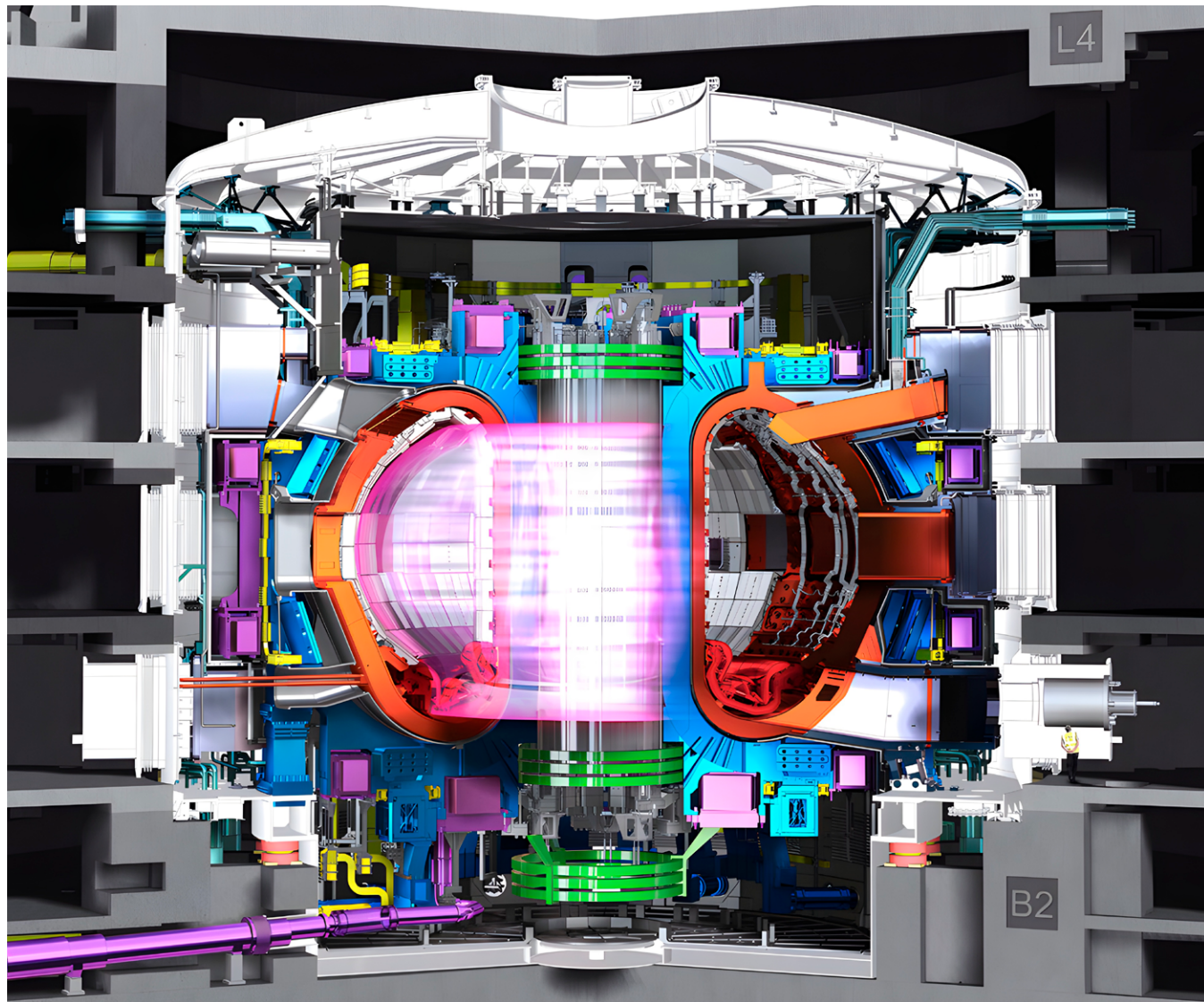


Imagen 1: Representación del tokamak de ITER. En naranja, la cámara de vacío; en celeste, el sistema magnético; en rojo, el manto; en azul, el divertor; y en verde, el criostato.

REACTORES DE FUSIÓN HOY: ITER COMO REFERENCIA

En un inicio, Estados Unidos y la Unión Soviética eran los países que poseían la mayor parte de los conocimientos e investigaciones en materia de energía nuclear, con la finalidad de desarrollar armas nucleares. Fue por esta controversia que en 1953 el presidente estadounidense Dwight D. Eisenhower pronunció el discurso "Átomos para la paz" en el que dijo: "mi país quiere ser constructivo, no destructivo. Quiere acuerdos, no guerras, entre naciones. Se quiere a sí mismo viviendo en libertad y en confianza de que la gente de todas las demás naciones disfruten igualmente del derecho de elegir su propia forma de vida" (Eisenhower, D. 1953).

Así dio a entender el nuevo curso que tomaría el desarrollo de la energía nuclear. Sin embargo, los altos costos de realización de este tipo de proyectos, que se encuentran en la escala de las decenas de millones de euros y superando las centenas en algunos casos (Romanelli,

F., 2013), han llevado a fomentar la colaboración internacional.

Hoy se investiga la posibilidad de usar comercialmente la fusión nuclear en ITER, Reactor Termonuclear Experimental Internacional por su sigla en inglés (aunque este nombre se ha reemplazado simplemente por el significado en latín de iter, el camino), uno de los proyectos más relevantes a nivel mundial y que cuenta con la contribución de más de 35 países.

Está siendo construido en Cadarache, en el sur de Francia, y su misión es probar la viabilidad de la fusión como fuente de energía (ITER, s.f.). Dicho de otro modo, ITER no será utilizado para generar energía de consumo, sino que tiene como fin único la investigación. Su puesta en marcha será vital para descubrir nuevos requerimientos y probar el funcionamiento de varias tecnologías y materiales que se implementarán, sobre todo, en el corazón del reactor, el tokamak. En la fusión nuclear hay mucho camino recorrido en lo que se refiere a I+D e ingeniería, pero aún hay mucho que avanzar, por lo que

la colaboración de todos los países es necesaria.

El objetivo final de estos experimentos es construir un dispositivo en el que calentando y confinando el combustible (mezcla de deuterio-tritio) el tiempo suficiente, se produzca la reacción de fusión y así generar más energía que la aportada (Suárez, R., 2017).

Con estos antecedentes, el tokamak de ITER se diseñó con los siguientes desafíos:

1. Producir 500 MW de potencia de fusión a partir de 50 MW de entrada, es decir, entregar al reactor 50 MW para generar 10 veces esta cantidad.
2. Demostrar la operación integrada de las tecnologías para una central de potencia de fusión. Con esto podrán estudiarse los plasmas bajo condiciones de calor, control, diagnóstico y criogenización, similares a las que se esperan en las futuras plantas.

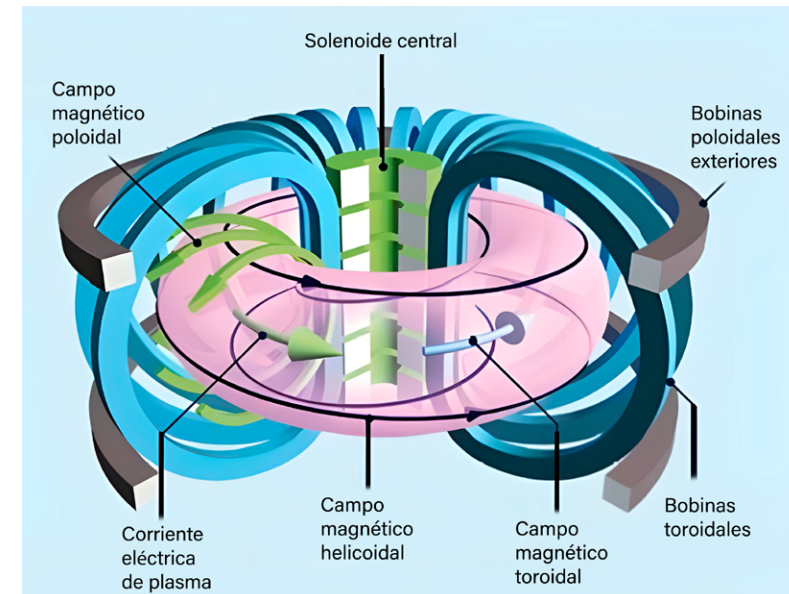


Imagen 2: Componentes básicos de un tokamak, incluyendo su sistema de imanes y campos magnéticos.

3. Obtener un plasma deuterio-tritio en una reacción autosostenida con el calor interno por más de 300 segundos.

4. Probar la reproducción de tritio dentro de la cámara, es decir, extraer el tritio del litio directamente en el reactor.

5. Demostrar las características de seguridad de un dispositivo de fusión y así demostrar las consecuencias insignificantes para el medio ambiente de las reacciones de fusión.(ITER, s.f.)

Durante varios años se realizaron estudios con la finalidad de encontrar la tecnología y materiales correctos para construirlo. Los componentes principales del tokamak de ITER son la cámara de vacío, el sistema magnético, el manto, el divertor y el criostato (ver imagen 1).

La cámara de vacío es un contenedor sellado que brindará un ambiente propicio a la reacción, en su interior se encontrará el plasma y se producirán las reacciones. La cantidad de energía que es capaz de producir es directamente proporcional al número de reacciones de fusión que toman lugar en su núcleo. El tamaño del contenedor en ITER es 10 veces mayor que la cámara más grande que hay en la actualidad, lo que equivale a unas 17 personas de altura (imagen 3) y lo que le permitirá contener más y mejor plasma.

La capa protectora de la cámara de vacío se llama manto y está en contacto directo con el plasma. La propuesta de ITER es utilizar berilio, un elemento de baja activación para que los materiales del manto no se vuelvan radiactivos (ITER, s.f.).

En la parte baja de la cámara de vacío se ubica el divertor, cuya misión es remover el calor y la ceniza producidos por la fusión, para que no contaminen el plasma. Su posición es estratégica, está en el punto en el que se intersectan las líneas

de los campos generados por el sistema magnético, que genera el movimiento del plasma al interior de la cámara de vacío, además de mantenerlo alejado de las paredes. En ITER este sistema será capaz de generar un campo magnético tres millones de veces mayor que el de la Tierra, por lo que se implementará un sistema adicional de imanes, contrarrestando las inestabilidades que puedan surgir en el campo.

Finalmente, el tokamak completo está encerrado en un criostato, un edificio de 30 metros de altura con la única función de mantener el sistema magnético a una temperatura cercana a 0 Kelvin y aislarlo del calor de la reacción.

Con estas partes, las innovaciones en materiales y la tecnología aplicada a ellos, se espera que para el 2025 el ITER comience a funcionar generando su primer plasma y que para el 2035 ya se encuentre totalmente operativo, brindando una visión más detallada de la viabilidad de la fusión como fuente de energía a futuro.

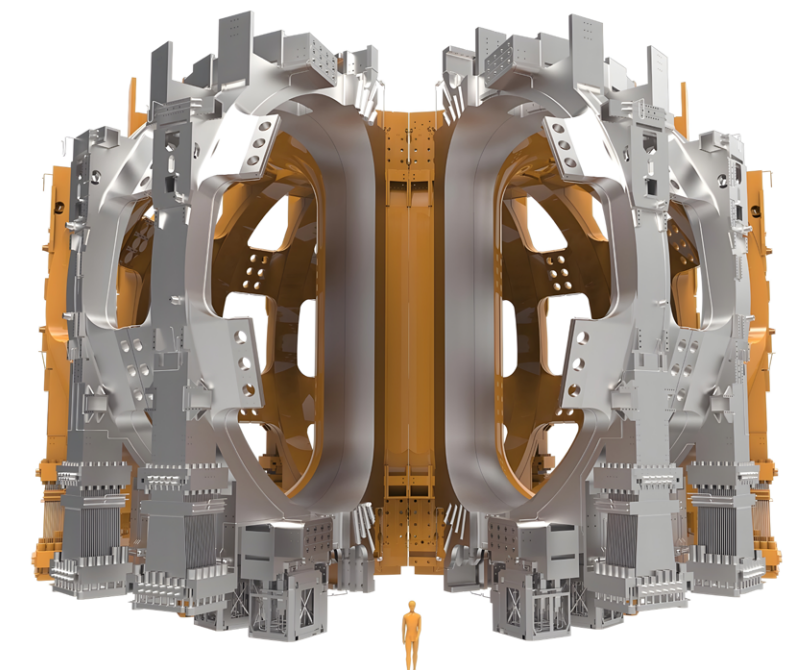


Imagen 3: Comparativa de tamaños entre la estructura de ITER y una persona promedio.

CUESTIONAMIENTOS

A lo largo de los años el desarrollo de la fusión nuclear ha tenido bastantes detractores, debido a que en la mayoría de ocasiones se le confunde con su par, la fisión nuclear. Organizaciones como Greenpeace suelen emitir comentarios como "La energía de fusión creará serios problemas de desechos, emitirá grandes cantidades de material radiactivo y podrá ser usada para producir armas nucleares. Un nuevo abanico de riesgos nucleares será creado" (2005), lo que genera desinformación en aquellas personas que no poseen conocimientos sobre fusión nuclear. Además, se trata de una aseveración errada.

La fusión nuclear de deuterio y tritio tiene como producto el helio, gas no radiactivo, por lo que esta reacción no tendría asociados desechos nucleares. El único componente radiactivo utilizado en esta fusión es el tritio y, posteriormente, los materiales del reactor que sean activados por los neutrones mientras el reactor esté en funcionamiento. Esta activación es lo suficientemente baja como para que los materiales puedan ser reciclados y reutilizados en 100 años (ITER, s.f.).

La fusión nuclear tampoco presenta riesgo de proliferación nuclear, ya que a diferencia del uranio y plutonio usado en los reactores de fisión, el deuterio y tritio no son fisionables, por lo que no hay materiales en un reactor como ITER que puedan ser usados para la fabricación de armas nucleares (ITER, s.f.).

Finalmente, los riesgos nucleares asociados con la fusión se limitan al uso del tritio. Sin embargo, como la cantidad usada se limita a unos cuantos gramos el riesgo es mínimo, al igual que el impacto de la radioactividad del tritio en las personas, pues esta es mucho menor que la radiación natural que encontramos en el medio ambiente.

Por último, casos extremos como los incidentes de Chernobyl o Fukushima son imposibles en un reactor de fusión. Las reacciones de fusión no pueden ser mantenidas espontáneamente, ya que cualquier perturbación en el plasma detiene la reacción. De este modo, el riesgo de una explosión es nulo porque, en caso de ocurrir, el reactor dejaría de funcionar (ITER, s.f.).

LA FUSIÓN NUCLEAR FRENTE A OTROS TIPOS DE ENERGÍA

Ahora vamos a comparar la fusión nuclear y otras fuentes energéticas en relación a la energía generada, a las emisiones de gases de efecto invernadero, a los costos de producción, seguridad y materias primas.

- Fusionar átomos de manera controlada produce cuatro millones de veces más energía que reacciones químicas como quemar carbón o gas, y cuatro veces más que fisiónar átomos (ITER, s.f.). De hecho, para conseguir la energía que consume una ciudad de un millón de habitantes es necesario contar con 250 mil toneladas de petróleo o 400 mil toneladas de carbón, lo que equivaldría a 60 kg de combustible para fusión (F4E, s.f.). Además, el hecho de poder generar energía independiente de las condiciones climáticas le da una ventaja por sobre las energías renovables.

- Las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de electricidad de las plantas nucleares están al menos dos órdenes de magnitud bajo los combustibles fósiles y son comparables a la mayoría de renovables, con valores cercanos a cero (Sims, R., 2003). En las centrales nucleares, la electricidad se genera a partir de calentar agua y mover una turbina, por lo que las chimeneas expulsan vapor. La contaminación que generan es comparable a la que produce la energía eólica (IPCC, 2014).

- La energía nuclear de fisión posee costos de producción por KWh más bajos que los combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo (Ventix velocity suite, 2009). Si bien los costos de producción de electricidad mediante fusión son más altos que los de fisión, se espera que a mitad de este siglo, gracias al desarrollo de la

tecnología, sean similares a los de fisión (ITER, s.f.). Sin embargo, a pesar de lo promisorio de sus costos de producción, un punto en contra es el alto costo de construcción de las plantas para este tipo de energía. Al año 2016 se estimaba un costo de construcción para ITER de 13 mil millones de euros (ITER, s.f.), lo que está muy por encima de los costos de construcción de otros tipos de plantas.

- En términos de seguridad, incluso tomando en cuenta incidentes como los ocurridos en Chernobyl o Fukushima en los cálculos, la realidad es que la fisión nuclear está más cercana a las energías renovables como la solar o eólica, siendo la que produce menos muertes por cantidad de energía generada. Considerando que casos como los mencionados no son posibles en reactores de fusión, lo lógico es pensar que la fusión nuclear es aún más segura que la fisión (ver imagen 4) y más aún: es el polo opuesto al carbón, que mata diariamente a 4.400 personas tan sólo en China (Desjardins, J., 2018).

- Finalmente y respecto a sus materias primas: "Los combustibles de fusión básicos de los que se extraen y generan el deuterio y el tritio son el agua y el litio. El 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua y el 30% de la superficie terrestre está cubierta por roca. Hay suficiente deuterio para abastecernos durante millones de años y litio fácilmente extraíble durante varios cientos de años." (F4E, s.f.). Esto da a la fusión nuclear y las energías renovables una gran ventaja por sobre la fisión (por la dificultad de obtener uranio y plutonio) y los combustibles fósiles, además de evitar conflictos entre países por la posesión de estos últimos.

¿Cuál fuente de energía ES LA MÁS SEGURA?

El uso de energía es una necesidad en la economía moderna, pero las formas de extraerla y usarla también generan una peligrosa concesión.

- La nuclear es la más segura**
Aun incluyendo a los incidentes de Chernobyl y Fukushima, la energía nuclear es la fuente energética más segura por TWh generado.
- Un futuro brillante**
Existen algunas muertes atribuibles a las fuentes renovables, tales como accidentes y a través del análisis de ciclo de vida*, pero están entre las formas más seguras de obtener energía en la Tierra.
- Daño por agua**
Las hidroeléctricas normalmente son muy seguras, pero existe un caso aislado que sesga los datos. En 1975, la represa de Banqiao en China colapsó durante un tifón, dejando 171.000 personas muertas.
- Muerte negra**
Cuando los costos humanos y medioambientales del carbón son sumados, es la fuente energética más peligrosa con amplia diferencia. La contaminación del aire en China mata más de 4.400 personas al día.

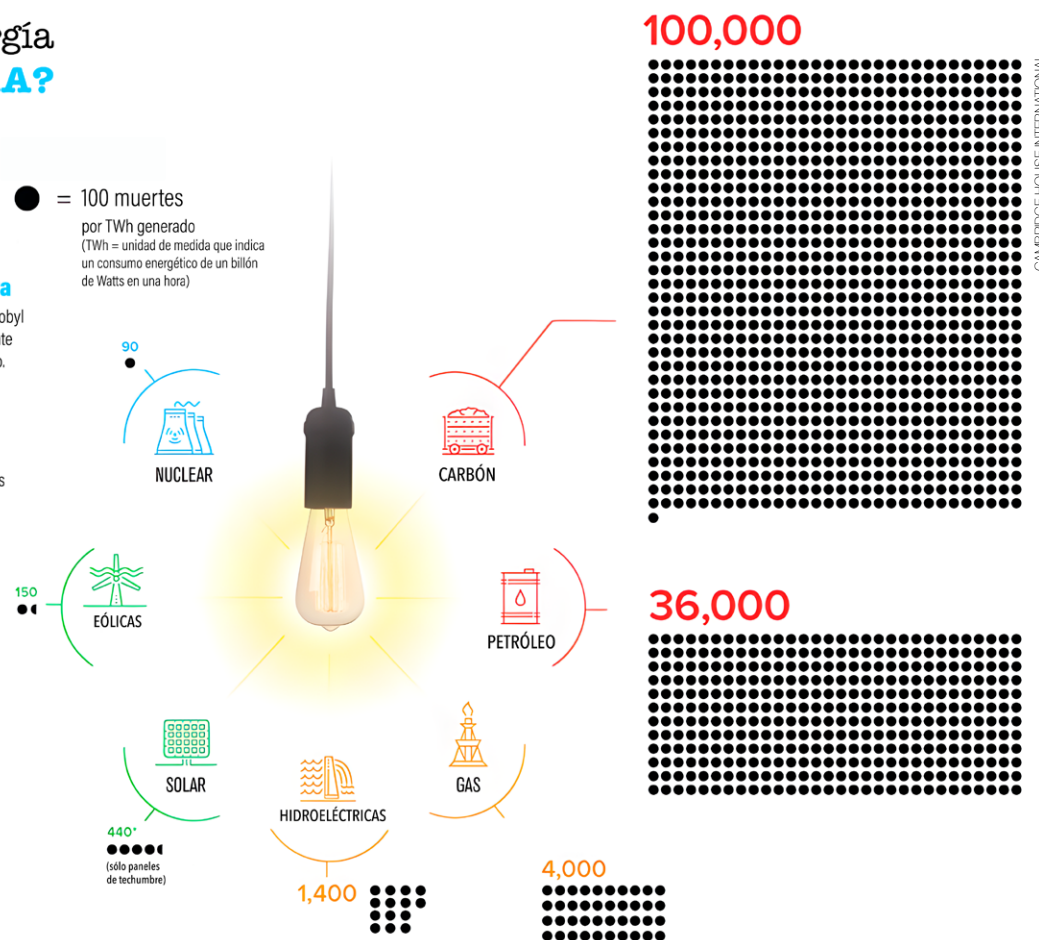


Imagen 4. Comparativa de cantidad de muertes producidas por TWh generado para las principales fuentes energéticas.

CONCLUSIONES

Lo expuesto permite concluir que la fusión nuclear es una alternativa muy prometedora a futuro, ya que podría brindar energía eléctrica prácticamente ilimitada, limpia y segura. Sin embargo, persiste el problema de que su factibilidad tecnológica debe ser probada para, posteriormente, comprobar su viabilidad económica.

Aún queda un gran camino por recorrer en cuanto al desarrollo, prueba y experimentación de las tecnologías aplicadas en reactores de fusión. Este proceso requiere de una gran inversión tanto en tiempo como en dinero; mientras los gobiernos sigan apoyando y financiando proyectos como ITER, llegar a ver resultados es solo cosa de tiempo. Sin ir más lejos, ya nos encontramos a pocos años del inicio de operaciones en ITER, probablemente el paso más importante para tener una noción de cómo luce el futuro de la energía nuclear.

La fusión nuclear, específicamente por confinamiento magnético, podría contribuir para el futuro de la sociedad. Solo hace falta más tiempo e investigación para aprovechar su potencial. Su desarrollo permitiría disminuir los conflictos políticos por la tenencia de materias primas relacionadas a la obtención energética y acelerar el reemplazo de los combustibles fósiles para generar energía, lo que es vital para combatir los efectos del calentamiento global.

Si bien una central de fusión tendría como producto vapor de agua (un gas de efecto invernadero), su impacto ambiental es considerablemente menor al de cualquier otra de las principales alternativas energéticas actuales. Por lo mismo, sin ser perfecta ni totalmente limpia, en caso de probarse su factibilidad seguiría siendo la mejor solución que se investiga en este momento, por lo que vale la pena continuar estudiándola para frenar el uso de los combustibles fósiles que tanto daño causan al planeta.

Es relevante destacar que uno de los objetivos implícitos de este artículo, el de informar cómo funcionan la fusión nuclear y un reactor basado en ella, y su desarrollo en la actualidad; es ayudar a comprender de mejor manera lo que puede ser leído o escuchado tanto en medios de comunicación u otras fuentes, para formar juicios propios fundados en el conocimiento, sin dejarse llevar por la desinformación que abunda en internet o en grupos que se oponen al desarrollo de estas tecnologías. Se trata de asunto de vital relevancia, ya que juegan un importante rol en la sostenibilidad futura del mundo como lo conocemos.



Vista aérea del sitio de construcción del reactor de ITER.

REFERENCIAS

- Chang, R., College, W. (1999).** "Química". 7a Edición, México, D.F., McGraw-Hill
- Eisenhower, D. (1953).** "Atoms for peace speech" Recuperado de: <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>
- Desjardins, J. (2018).** "Energy metals: the world's safest source of energy will surprise you" Recuperado de: <https://cambridgehouse.com/news/7971/energy-metals-the-worlds-safest-source-of-energy-will-surprise-you>
- F4E, (s.f.).** "What is fusion" Recuperado de: <https://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/>
- Greenpeace, (2005).** "Nuclear fusion reactor project in France: an expensive and senseless nuclear stupidity" Recuperado de: <https://www.greenpeace.org/archive-international/en/press/releases/2005/ITERprojectFrance/>
- IEA, (s.f.).** "Electricity statistics" Recuperado de: <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
- IAEA, (2002).** "ITER technical basis", Plant Description document, Capítulo 1. Recuperado de: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/ITER-EDA-DS-24.pdf>
- INFIP, (s.f.)** "The Institute for Plasma Physics (INFIP)" Recuperado de: <http://www.lfp.uba.ar/en/index.php>
- IPCC, (2007).** "Climate change 2007, Mitigation of climate change" New, York, Cambridge University Press. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf
- IPCC, (2014).** "Annex iii Technology-specific cost and performance parameters", Tabla A.III.2 Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- ITER, (s.f.).** Recuperado de: <https://www.iter.org/>
- Moral, N. (2017).** "Curso básico de fusión nuclear" Capítulo 3. Madrid, Sociedad nuclear española. Recuperado de: http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf
- National Petroleum Council, (2007).** "HardTruths, Enfrentando el grave problema energético", Washington D.C., National petroleum council. Recuperado de: https://www.npc.org/Hard_Truths-Translations/HARDTRUTHS_Spanish.pdf
- OECD (2003).** "Nuclear energy today" Recuperado de: <https://www.oecd-nea.org/pub/nuclearenergytoday/3595-nuclear-energy-today.pdf>
- Oliva, E. (2017).** "Curso básico de fusión nuclear" Capítulo 1. Madrid, Sociedad nuclear española. Recuperado de: http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf
- ONU (2019).** "Global environment outlook GEO-6 summary for policymakers" Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27652/GEO6S-PM_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ONU (2019).** "World Population Prospects 2019" Recuperado de: <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>
- Romanelli, F. (2013).** "A roadmap to the realization of fusion energy" Recuperado de: https://fire.pppl.gov/FESAC_Romanelli_012013.pdf
- Serway, R., Moses, C., Moyer, C. (2005).** "Física moderna", 3a Edición, México, D.F., CENGAGE Learning.
- Sims, R., Rogner, H. (2003).** "Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation." Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421502001921>
- Suárez, R. (2017).** "Curso básico de fusión nuclear" Capítulo 7. Madrid, Sociedad nuclear española. Recuperado de: http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf
- Ventix velocity suite. (2009).** "U.S. Electricity production costs" Recuperado de: <http://www.ncsl.org/documents/energy/Cohen0110.pdf>