

Parte II – Propostas de ensino  
**Energía nuclear: una cuestión sociocientífica para el desarrollo del  
pensamiento crítico**

Jordi Solbes  
Nidia Torres

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

SOLBES, J., and TORRES, N. Energía nuclear: una cuestión sociocientífica para el desarrollo del pensamiento crítico. In: CONRADO, D.M., and NUNES-NETO, N. *Questões sociocientíficas: fundamentos, propostas de ensino e perspectivas para ações sociopolíticas* [online]. Salvador: EDUFBA, 2018, pp. 375-394. ISBN 978-85-232-2017-4.  
<https://doi.org/10.7476/9788523220174.0019>.

---



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia [Creative Commons Reconocimiento 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# ENERGÍA NUCLEAR

## UNA CUESTIÓN SOCIOCIENTÍFICA PARA EL DESARROLLO DEL PENSAMIENTO CRÍTICO

Jordi Solbes  
Nidia Torres

### Introducción

Es difícil encontrar un tema científico que haya tenido tanto impacto en la historia mundial en varios niveles o aspectos, como la energía nuclear. Podemos apuntar impactos de este tema a nivel tecnológico (bombas atómicas y de hidrógeno, centrales nucleares), económico (el coste de los armamentos, la consolidación del complejo militar-industrial, las empresas nucleares), político (las relaciones entre países, la guerra fría), social y ambiental (la contaminación radiactiva fruto de las pruebas y los accidentes nucleares) y cultural (surge el tema de la responsabilidad del científico, que se refleja en la literatura y en libros de divulgación de los propios científicos). Por todo esto, es un tema que nos muestra las relaciones Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) en su integridad. (SOLBES; VILCHES, 1997)

Así, en este trabajo, se trata de comprobar si el alumnado es capaz de interpretar los procesos energéticos vinculados con las reacciones nucleares. Y, yendo más allá para incluir sobre todo los contextos de la Sociedad y del Ambiente, si es capaz de utilizar estos conocimientos para la comprensión y valoración de cuestiones socio-científicas como el armamento y reactores nucleares, siendo conscientes de sus riesgos y repercusiones.

En base a esto, nuestro objetivo en este capítulo es plantear junto a unos conceptos básicos (isótopo, curva de energía de enlace, reacción de fisión y fusión) un caso en formato de Cuestión Sociocientífica (CSC), que incluye los tópicos principales: las consecuencias de las bombas atómicas, el papel de los científicos en su construcción pero también en su rechazo y el precio que pagaron por este último y, por último, aplicar el pensamiento crítico a los argumentos acerca de las centrales nucleares.

## Una CSC acerca de la energía nuclear

Esta CSC, presentada en la forma de un caso, se aplica a los últimos cursos de secundaria o primeros universitarios y las áreas de conocimiento implicadas son la física y química nuclear, la historia de la ciencia y la historia universal. El caso se visualiza en el Cuadro 1, con algunos objetivos de aprendizaje en Cuadro 2. Es posible abordar los tópicos apuntados arriba en 4 momentos distintos de una Secuencia Didáctica (SD) (con la CSC en formato de caso) sobre el tema energía nuclear.

### Cuadro 1 – CSC sobre energía nuclear

Una consulta pública es realizada en un determinado Estado brasileño\* sobre la necesidad de la instalación de una central nuclear para generar más energía. A los estudiantes, se pide para posicionarse en contra o en favor de la propuesta y cada estudiante o grupo de estudiantes debe formular sus argumentos para soportar sus conclusiones.

**Fuente:** elaboración de los autores.

En la próxima sección, para la resolución del caso, se proponen a las y los estudiantes cuatro actividades/momentos, compuestos de textos, en letra normal (y señalizados por la letra T), y preguntas, en letra cursiva (y precedidas por una letra P); luego, en seguida, ponemos comentarios de soporte al profesor están sangrados (y precedidas por una letra C).

---

\* En la aplicación, el profesor/maestro puede tener en cuenta que Estados brasileños, como Sergipe y Pernambuco, han sido candidatos a la instalación de centrales de energía nuclear (<http://www.eletronuclear.gov.br/>). Además, en el Estado de Bahia, específicamente en la ciudad de Caetité, ya existen importantes minas de uranio, en que se planea reanudar el suministro de uranio para las centrales Angra 1, 2 y 3 en el Estado de Rio de Janeiro, Brasil (<http://www.ebc.com.br/noticias/2015/06/producao-de-uranio-da-mina-de-caetite-na-bahia-sera-retomada-em-2016>). La central Angra 3 está en proceso de instalación (<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-04/investigacoes-sobre-irregularidades-em-angra-3-serao-concluidas-ate-julho>).

**Cuadro 2** – Algunos objetivos de aprendizaje para la CSC

Objetivos de aprendizaje		
Conceptuales	Procedimentales	Actitudinales
Comprender los principales conceptos, su vinculación a problemas de interés y su articulación en cuerpos coherentes de conocimientos. En concreto, el descubrimiento del núcleo, su composición y el concepto de isótopo, la energía de enlace, y las reacciones nucleares: estudio de las reacciones de fisión y fusión, sus aplicaciones en armamentos y producción de energía y riesgos y repercusiones (residuos de alta actividad, problemas de seguridad etc.) de las mismas.	Estar informado sobre el tema, no limitarse a los discursos dominantes, conocer posturas alternativas, cuestionar la validez de los argumentos rechazando conclusiones no basadas en pruebas, detectar falacias argumentativas, evaluar la credibilidad de las fuentes teniendo en cuenta los intereses subyacentes y crear argumentaciones sólidas. Aplicar los conocimientos físicos pertinentes a la resolución de problemas de la vida cotidiana.	Valorar la necesidad de trabajar para lograr un futuro sostenible y satisfactorio para el conjunto de la humanidad, una vez que ya han sido comprendidas las complejas interacciones actuales de la física con la tecnología, la sociedad y el ambiente. Posicionarse críticamente con respecto al uso de la energía nuclear. Organizarse en grupos para divulgar informaciones a la comunidad sobre las ventajas y los riesgos del uso de la energía nuclear, así como las respectivas consecuencias sociales y ambientales

**Fuente:** elaboración de los autores.

## Mecanismos que permitan aplicar y discutir la CSC

Esta actividad se puede plantear como un debate, pero hay que tener presente que se puede generar un debate siempre que se pone a gente a defender posturas diferentes (solo hay que ver algunos programas televisivos). El tema es que en los debates socio-científicos, es decir, en controversias sociales que tienen su base en temas científicos, muchas veces la comunidad científica tiene un fuerte consenso respecto a una de las posturas, con lo cual generar un debate es darle alas a una postura que no las tiene o favorecerla, porque el alumnado que participa en los debates piensa que en los mismos se tiene que llegar a un equilibrio de las posturas enfrentadas. Un ejemplo típico de ello es el debate sobre la validez científica o no de la astrología, ya que en el fondo, la confrontación con científicos da más autoridad a los astrólogos. Igualmente sucede con el debate sobre el cambio climático y su origen antrópico. De hecho, estos debates nunca se cierran porque hay detrás intereses de grupos poderosos que quieren mantenerlos. (SOLBES, 2013b)

Podemos encontrar información sobre la energía nuclear y sus implicaciones sociales y ambientales en múltiples libros y artículos de historia y sociología de la ciencia (BOWLER; MORUS, 2005; JEROME, 2002; KRAGH, 2007; SÁNCHEZ RON, 2006, 2014; SOLBES, 2013a, 2013b); libros de literatura (FRAYN, 2000; KIPPHARDT, 1966; VOLPI, 1999), reflexiones de científicos conscientes de su responsabilidad (BORN, 1968; RAMÍREZ MARTÍN; FERNANDEZ-RAÑADA, 1996; SALAM, 1986; WEISSKOPF, 1990) e incluso algunos libros de texto de física. (HEWITT, 2004; TIPLER, 2003)

A continuación, se presentan los tópicos que se pueden abordar en el aula alrededor de la CSC relacionada con la energía nuclear: descubrimiento del núcleo y los isótopos; reacciones nucleares; las bombas atómicas y sus consecuencias; las centrales nucleares: sus repercusiones y riesgos.

## Descubrimiento del núcleo y los isótopos

T: El estudio de la dispersión de partículas alfa por finas láminas de oro en 1911 sorprendió a Rutherford, que dijo: *“Lo que pasaba era tan increíble como si alguien hubiese disparado un proyectil hacia un papel de seda y el proyectil volviese hacia el cañón”*. Y le llevó a la idea de un átomo formado por un núcleo central (masivo y cargado positivamente), alrededor del cual se movían los electrones. También se pudo determinar el radio del átomo y el núcleo de Au, encontrándose respectivamente  $r_{\text{átomo Au}} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  y el  $r_{\text{núcleo Au}}$  es  $7,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .

P: *¿Qué relación hay entre dichos radios? Si se toma como diámetro del átomo de Au la longitud de un campo de fútbol grande (120 m), ¿cuál sería el tamaño del núcleo?*

C: El radio del átomo es 18000 veces mayor que el del núcleo, lo que implica que la mayor parte del volumen ocupado por un átomo es espacio vacío. Pero como es tan difícil asimilar las magnitudes muy grandes o muy pequeñas, tan alejadas de la escala humana, proponemos la escala de un campo de fútbol para el diámetro atómico. Se obtiene para el núcleo:

$$14,6 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot \frac{120 \text{ m}}{2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 0,007 \text{ m} = 7 \text{ mm}$$

El tamaño de una pequeña bola de acero, prácticamente invisible desde la corteza del átomo.

T: Mediante los resultados obtenidos, se pudo determinar la carga del núcleo de una serie de elementos y se constató que coincidía con el número de orden del elemento en el Sistema Periódico, o sea, con su número atómico Z. Cuando Chadwick descubrió en 1932 el neutrón – una partícula neutra con masa ligeramente superior a la del protón – se admitió que el núcleo contienen Z protones y N neutrones, es decir, un total de  $A = Z + N$  nucleones. Se pudo así explicar la existencia de nuevos elementos con propiedades químicas idénticas a las de los elementos ya conocidos, aunque difieran en propiedades físicas. Son los isótopos, núcleos con el mismo número atómico Z y distinto número másico A y, por tanto, con las mismas propiedades químicas (es el mismo elemento) y distintas propiedades físicas.

P: *El hidrógeno presenta tres isótopos de masas 1, 2 y 3 que reciben, respectivamente, los nombres de hidrógeno, deuterio y tritio. Indica el número de protones, neutrones y electrones de que constan sus átomos.*

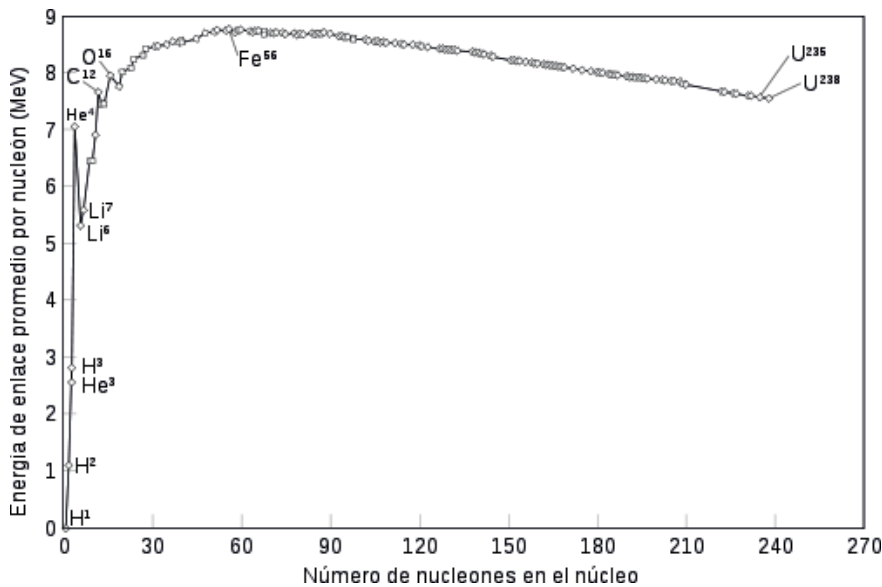
P: Justifica que la masa atómica del hidrógeno sea 1,008 en lugar de 1,000. ¿Cuál de los isótopos del hidrógeno debe ser el más abundante?

P: Cuántos protones, neutrones y electrones tienen los isótopos del Neón:  ${}_{10}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}_{10}^{21}\text{Ne}$  y  ${}_{10}^{22}\text{Ne}$ ?

C: Como es H, en todos el n° atómico es  $Z=1$ , pero el n° de neutrones es  $N=0,1$  y  $2$ , respectivamente. El isótopo más abundante es H-1. El n° de p y e- es  $Z$ , por tanto, todos tienen 10.  $N=10,11$  y  $12$  respectivamente.

P: Si se representa la energía de enlace por nucleón para los isótopos naturales en función del número másico ( $E_p/A = f(A)$ ) se obtiene la siguiente curva (Figura 1). Señalar cuáles son los aspectos más significativos que se aprecian en la misma.

Figura 1 – Energía de enlace por nucleón



Fuente: Wikipedia ([2015]).

C: Se representa en Mega electronvoltio (MeV), siendo el eV una unidad de energía que da la variación de energía potencial que experimenta un electrón al moverse en una diferencia de potencial de 1 voltio. Equivale a  $1,6 \times 10^{-19}$  J, obteniéndose este valor de multiplicar la carga del electrón ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) por la unidad de potencial eléctrico (V). Se obtienen una curva como una colina en la que el valor de la energía de enlace por nucleón crece rápidamente al aumentar el número másico A, alcanzando un valor prácticamente constante, de unos 8 MeV, a partir de  $A > 16$ . Alcanza su cima para  $A = 56$  (Hierro) y, por encima de  $A = 60$ , aproximadamente, la curva disminuye lentamente, lo que indica que los núcleos más pesados y más ligeros se

mantienen unidos menos firmemente que los de la zona central (Fe, Co, Ni). Más adelante veremos que este hecho permite la liberación de energía en los procesos de fisión y fusión. En segundo lugar, se presentan una serie de picos para los núcleos He-4, C-12, O-16, que indican una estabilidad superior de dichos isótopos con respecto a los más próximos. Todo parece indicar que los núcleos que tienen 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126 protones y/o neutrones son más estables y los elementos correspondientes, mucho más abundantes en la naturaleza, por lo que son denominados números mágicos. Es una situación similar a lo que ocurriría con los átomos con 2, 10, 18, 36, 54 y 86 electrones en la corteza (los gases nobles) cuya estabilidad es la mayor de todos los elementos. Este hecho pone de manifiesto la existencia de niveles energéticos en el núcleo, lo que llevó en 1949 a Johannes H. D. Jensen y a Maria Goeppert Mayer a proponer un modelo de capas para el núcleo.

## Reacciones nucleares

T: Se dice que se produce una reacción nuclear cuando un núcleo se ve alcanzado por otro o por una partícula más simple.

*P: Aplicando las leyes de conservación de A (nº de nucleones) y Z (carga), escribe las siguientes reacciones: la transmutación del N-14 al bombardearlo con partículas alfa (He-4), en la que se observa la emisión de protones; el bombardeo de Be-9 o Al-27 con He-4, en las que se emiten neutrones. Señalar su importancia.*

C: Se trata de reacciones históricamente importantes. En la primera tenemos la primera transmutación artificial, la del Nitrógeno-14 al bombardearlo con Helio-4 (partículas alfa), en la que se produce O-17 y permitió a Rutherford observar la emisión de protones en 1919. En la 2ª el bombardeo de Berilio-9 con Helio-4, que produce Carbono-12 y condujo a Chadwick al descubrimiento del neutrón en 1932. En 1934 el matrimonio Frédéric Joliot e Irene Curie descubren la radiactividad artificial al bombardear Aluminio-27 con partículas alfa, que producen un neutrón y Fósforo-30 que emite radiación. En 1934 Enrico Fermi inicia experimentos sistemáticos para producir isótopos radiactivos por absorción de neutrones.

T: De hecho, incluso aunque la partícula incidente tenga energía suficiente, hay que tener en cuenta que para provocar dicha reacción, es preciso acelerar haces de partículas (núcleos, protones) en número muy superior a los que llegan a colisionar, con lo que en realidad se consume más energía que se libera en una transmutación nuclear. Para que la energía liberada en una reacción nuclear pueda aprovecharse, es necesario que, una vez iniciada, pueda automantenerse, como ocurre, por ejemplo, en una reacción química exotérmica.

*P: Otto Hahn y su ayudante Fritz Strassman descubren en 1938 que al bombardear Uranio-235 con neutrones lentos se produce Bario-144. ¿Puedes explicar lo que se ha producido?*

*A partir de la curva de E de enlace por nucleón, ¿puedes explicar la energía producida a partir la curva de energía de enlace por nucleón  $E_b/A$ ?*

C: Aunque Hahn no fue capaz de explicarlo, le comunicó los resultados a Lise Meitner, que por su origen judío había tenido que abandonar Alemania. Ella y su sobrino Otto Frisch, fueron capaces de explicarlo al sugerir que el núcleo se había partido en dos, se había fisionado. Por otra parte, la curva  $E_b/A$  muestra que los isótopos más estables son los de masas atómicas próximas al nucleido Hierro-56. Por ello, los elementos pesados como el Uranio-235 o el Plutonio-239, sometidos a bombardeo de neutrones, que no son repelidos por el núcleo al carecer de carga, se pueden romper en dos o más núcleos de masa intermedia. La  $E_b/A$  de estos isótopos es de unos 8,5 MeV/nucleón y la del U-235, menos estable, es de 7,6 MeV/nucleón. Se libera una energía de 0,9 MeV/nucleón. Se puede determinar el valor exacto calculando el defecto de masa de la reacción, pero esto sólo se realizaría con alumnado de los primeros cursos universitarios.

*P: El deuterio al interactuar con el tritio da helio y un neutrón ¿Qué tipo de reacción es y cuál es aproximadamente la energía liberada?*

C: Se trata de una reacción de fusión:  ${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$ . Dado que el He-4 es muy estable, con 7 MeV/nucleón y que los reactivos H-3 con 3 MeV/nucleón y H-2 con 1 MeV/nucleón, esto nos indica que se puede liberar unos 5 MeV/nucleón, mayor que en las reacciones de fisión.

## **Las bombas atómicas y sus consecuencias**

*P: ¿Qué conoces sobre las aplicaciones militares de la ciencia? ¿Cuándo comienzan a realizarse de una forma sistemática?*

C: En todas las épocas se ha aplicado la ciencia fines militares: desde Arquímedes al cálculo de la trayectoria de una bala de cañón pasando por la formación de ingenieros y artilleros militares. Sin embargo, hasta el siglo XX la ciencia desempeñó sólo un papel subordinado en la guerra.

Por ello la aportación de los científicos fue poco valorada por los aliados en los inicios de la Gran Guerra y se enviaron algunos científicos jóvenes en la frente, como por ejemplo Moseley en Gallipoli, donde murió en el año 1915. Posteriormente, la carencia de productos químicos importados de Alemania (tintes, acetona, fenol) y la necesidad de detectar los submarinos U alemanes (primero con micrófonos y luego mediante el eco de ultrasonidos), obligaron a utilizar la ciencia en esa guerra, que ha sido denominada con frecuencia la guerra de la química. Esta pudo desempeñar un papel muy importante porque la industria química (más desarrollada que la industria relacionada con la física) fue capaz de aportar productos como los explosivos, los gases tóxicos o los tintes. Un ejemplo característico es el problema que se le



plantea en Alemania cuando el bloqueo naval, impide sus importaciones de abonos (nitrato de Chile). La síntesis del amoníaco de Haber y Bosch, realizada en 1913 en la empresa BASF, permitió a Alemania abastecerse del producto y producir las municiones y fertilizantes que necesitaba. Esta síntesis del amoníaco, por la que en 1918 se concedió el premio Nobel de Química a Haber, pone a su vez de manifiesto cómo la ciencia puede ser utilizada tanto para el desarrollo de la agricultura y el bienestar de la humanidad como para la guerra. (SÁNCHEZ RON, 2006; SOLBES, 2002) En cambio, en la II Guerra Mundial, era evidente para todos los estados implicados, que la ciencia iba a desempeñar un papel decisivo, como veremos a continuación.

T: Un problema de la fisión es si se puede originar una reacción en cadena. Esto se comprobó experimentalmente por Fermi y Joliot en 1939. Cuando Szilard conoce este hecho promueve, junto con Wigner y Teller, que Einstein, que estaba en los Estados Unidos (EEUU) desde 1933, escribiese una carta al presidente F.D. Roosevelt en 1939 en la que sugería el desarrollo de armas nucleares, para adelantarse al proyecto de los alemanes. Se inicia así proyecto Manhattan, dirigido por el general Groves, en el que se invirtieron 2191 millones de dólares y participaron físicos de Europa huidos del nazismo como Bethe, Teller, Wigner, Peierls, Szilard, Weisskopf, Franck, Fermi, Segré o Bohr y estadounidenses como Oppenheimer (director científico), Feynman, Lawrence, Compton, Seaborg, Condon, Urey, Álvarez o Wheeler.

P: ¿Cuál era el objetivo de dicho proyecto? ¿Cuáles fueron sus consecuencias?

C: El objetivo era la construcción de las primeras bombas atómicas que se lanzaron en 1945 en Hiroshima (*Little boy*, con 12 kilotones (kt), es decir, 12.000 toneladas de TNT) donde en un radio de 500 m de la explosión todo fue incinerado, a 3 km todos los edificios fueron destruidos y se produjo un hongo de polvo que ascendió 12 km, murieron 145.000 personas; y en Nagasaki (*Fat man*, de 22 kt), produjo 70.000 víctimas. La primera era de Uranio enriquecido y la segunda de Plutonio (elemento inexistente en la Tierra y producido en el primer reactor nuclear). Sobre el mismo se puede visionar la excelente película de Roland Joffé, *Fat Man and Little Boy* que se exhibió en España con el título de *Creadores de sombras* y en Latinoamérica con los títulos de *Arma secreta* y *Proyecto Manhattan*, en la que participan actores tan conocidos como P. Newman o J. Cusak (se pueden ver fragmentos de la misma donde se presentan dichos problemas, así como los conflictos morales y políticos que tuvieron los científicos, que se plantearan en otra actividad). Sus principales consecuencias, además de 210.000 víctimas, fueron el final de la II Guerra mundial en el Pacífico, el inicio de la carrera nuclear y la guerra fría, el aumento de dinero destinado por los gobiernos a Investigación y Desarrollo (I+D) y el nacimiento de la gran ciencia y del complejo militar-industrial. Eisenhower, presidente de los EEUU y general de la II Guerra mundial, advertía en 1960 del enorme poder que había acumulado este último.

*P: Las investigaciones del proyecto plantearon problemas, de los que surgieron conceptos como enriquecimiento del uranio, reacción en cadena y su control o masa crítica, que ahora forman parte del lenguaje ordinario. ¿Puedes explicar lo que significan?*

C: Hubo difíciles problemas que fue necesario resolver para producir la fisión. En primer lugar, la escasez (0,7%) del isótopo U-235 en el uranio natural y por eso hay que enriquecerlo mediante complejos procesos de difusión o ultracentrifugación. Una reacción en cadena es una serie de reacciones, para las que es necesario que en cada fisión se emitan dos o tres nuevos neutrones, que puedan colisionar con otros átomos de uranio. Además, los neutrones que se producen en la fisión son rápidos y la probabilidad de que el núcleo de U-235 absorba un neutrón sólo es elevada para neutrones lentos. Y hay que eliminar neutrones si se quiere controlar la reacción (en un reactor). Por ello, hay que utilizar una sustancia, denominada moderador (agua pesada, grafito) para que absorba neutrones y los frene. Por último, si la masa de uranio es pequeña, la mayoría de los neutrones escaparán antes de que puedan originar otra fisión. Se necesita una cantidad de materia superior a una masa denominada “crítica” para que la reacción se automantenga. Para la producción de bombas atómicas es necesario emplear dos masas subcríticas durante el transporte, que se unían dando una masa superior a la crítica en el momento de la detonación.

*P: ¿Qué es la carrera nuclear? Busca información de los principales acontecimientos de la misma.*

C: El desarrollo de la bomba atómica por EEUU supone el inicio de la guerra fría y de la carrera nuclear, que prosigue al ser producido la bomba atómica en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) en 1949. Aunque disponían de un notable grupo de físicos, encabezados por Kurchatov, tardaron 4 años, porque su capacidad industrial era menor que la de EEUU. En el Reino Unido la consiguieron en 1952. La réplica norteamericana a la bomba atómica soviética fue la autorización en 1950 por el presidente Truman de un nuevo programa de investigación para desarrollar la bomba de hidrógeno. Los EEUU ensayaron la bomba H o termonuclear en 1952. Esto lleva a los soviéticos, en un proyecto dirigido por Andrei Sajarov, a producir su bomba H en 1953. En 1957 lo conseguían bombas atómicas los ingleses, en 1960 Francia y en 1964 China. En 1962 se produce la crisis de los misiles en Cuba que lleva a EEUU y a la Unión Soviética al borde de la guerra nuclear. En 1963, después de más de 500 explosiones nucleares, de 10 toneladas de Plutonio en la atmósfera y de muchas manifestaciones en contra de las mismas se firma el Tratado Parcial para la Prohibición de Pruebas, que las prohíbe en la atmósfera, el espacio exterior y bajo el agua, pero no las subterráneas. Ni Francia ni China lo suscribieron y continuaron su experimentación al aire libre. Las pruebas francesas cesaron en 1974, después de las protestas de los países del Pacífico Sur, los más directamente afectados por la radiactividad. En 1968 se firma Tratado de no Proliferación de armas nucleares, que

sólo autoriza a la posesión de las mismas a los países que habían realizado pruebas antes de 1967 (EEUU, URSS, Reino Unido [RU], Francia y China). Entre los no firmantes se encuentran Brasil, España, Argentina, Pakistán, India, Israel y Sudáfrica, todos ellos con capacidad de desarrollo de bombas, al disponer de centrales nucleares. En 1988 se firmó el Tratado de Fuerzas Nucleares de Alcance intermedio, por los presidentes R. Reagan y M. Gorbachov en las que accedían a destruir los misiles tácticos. En 1991, los presidentes Gorbachov y G. Bush firman el primer Tratado de Reducción de Armas Estratégicas, *START*. Por este acuerdo se destruirían un tercio de las armas estratégicas. En 1996 se firma el Tratado de Prohibición Completa de Pruebas Nucleares, salvo India, después de más de más de 2000 detonaciones, de las cuales 1054 correspondían a Estados Unidos, unas 800 a la Unión Soviética, 210 a Francia, 45 a RU, 45 a China, 5 o 6 a India, entre 3 y 6 a Pakistán y 2 a Corea del Norte. Estos acuerdos han permitido pasar de unas 50.000 cabezas nucleares en el mundo en 1985 (con 20.000 Mt), a 17.300 cabezas, 7.700 de EEUU, 8.500 de Rusia y el resto de Francia (300), China (250), Reino Unido (225), India (100), Pakistán (110) Israel (80) y Corea del Norte (<10). Pero siguen siendo suficientes para provocar la desaparición de la civilización humana y, más, si se tienen en cuenta que el polvo y el humo provocarían un invierno nuclear.

*P: Busca información sobre los cobayas del plutonio. ¿Qué cuestiones éticas están involucradas en el uso de personas en experimentos científicos?*

C: Además de las pruebas, que tuvieron importantes consecuencias ambientales y en la salud, otra práctica poco conocida y evidentemente poco democrática, es la utilización en EEUU, entre 1945 y 55 de 23.000 personas, sin su conocimiento, para estudiar los efectos de las radiaciones. Se realizaron experimentos del tipo de inyecciones de plutonio 238 y 239 o de uranio enriquecido, de exposición a nubes radiactivas, de irradiación masiva con rayos X etc. similares a los realizados por los médicos nazis. El seguimiento de estos casos perduró hasta los años 1970. Estos experimentos de utilización de seres humanos como “cobayas del plutonio” sólo se han conocido 20 años después de que finalizasen los controles y se realizaron porque los científicos implicados pensaban que no deberían responder nunca de ellos. (BELL, 1995) Se trata así a las personas como medios, sin tener en cuenta su dignidad.

T: La unanimidad de los científicos ante la bomba se rompe cuando en 1944 se sabe que los nazis no van a conseguir la bomba y, sobre todo, poco después de los lanzamientos de las bombas sobre Japón.

*P: Por grupos de trabajo, buscad información de los siguientes científicos para ver sus contribuciones a los proyectos nucleares y su apoyo o rechazo a los mismos, con los poderes y concepciones establecidos se vieron involucrados: Hahn, Lise Meitner, Heisenberg, Bohr,*

*Linus Pauling, Einstein, Fermi, Rotblat, Frederic e Irene Joliot-Curie, Max Born, David Bohm, Leo Szilard, Robert Oppenheimer, Victor Weisskopf, Teller, Harold Urey, Leite Lopes, Sajarov.*

C: Cuando Hitler sube al poder en 1933 se inicia su política belicista, nacionalista y antisemita, promulgándose la ley de restauración de la carrera del funcionariado, según la cual “los funcionarios que no sean de linaje ario han de ser jubilados o pasar a la situación de excedencia”. Más de 500.000 personas tuvieron que exiliarse de Alemania entre ellos unos 2.500 científicos. Uno de los primeros en ser perseguido fue Einstein. Reunía alguna de las características que más odiaban los nazis: era judío, pacifista y progresista. Schrödinger, por discrepancias ideológicas, abandonó Berlín en 1933, pasando a Austria, de donde tuvo que exiliarse al ser anexionada por Alemania en 1938. Otros físicos que tuvieron que exiliarse fueron Lise Meitner, Max Born, Stern, Bloch, Wigner, Bethe, Gabor, Heitler, London, Nordheim, Peierls, Teller, Szilard, Weisskopf, Fermi, Segre etc. Muchos de ellos colaboraron en los EEUU con el proyecto Manhattan y el proyecto radar, para localizar aviones o blancos con ondas de radio, por temor a que los nazis desarrollaran una bomba atómica. En el proyecto nazi de bomba atómica (*Uran-Verein*) participaron activamente científicos como Heisenberg, Hahn, Gerlach, von Weizsäcker, Wirtz, Harteck etc. Aunque los físicos alemanes no llegaron a producir la bomba posiblemente por falta de recursos económicos, consiguieron un reactor nuclear, producir agua pesada, separar los isótopos del uranio etc. Para trasladar los institutos de Hahn y Heisenberg desde Berlín al sur de Alemania en Oranienburg los nazis utilizaron prisioneros de guerra y ciudadanos deportados así como para trabajar en la industria militar alemana (Krupp, IG Farben, Tyssen). También se puede tratar este tema mediante la lectura de fragmentos de obras literarias antes mencionadas. (FRAYN, 2000; VOLPI, 1999)

La unanimidad empieza a romperse cuando en 1944 se sabe que los nazis no van a conseguir la bomba y Rotblat abandona el proyecto. Fue acusado de espionaje y se le mantuvo bajo vigilancia durante años. Fue secretario de Pugwash entre 1957 y 1973 y presidente de la misma a partir de 1988, recibiendo el Premio Nobel de la Paz en 1995. Otros científicos, como Bohr, Szilard, Franck, redactan informes y recogen firmas contra el lanzamiento de las bombas en Japón, en tanto que Lawrence, Compton y Oppenheimer, director científico del proyecto Manhattan, apoyaron públicamente el bombardeo. Esto evidencia que no es tan sencillo pasarles la responsabilidad sólo a políticos y militares. Pero una vez lanzadas y a la vista de que el propósito era intimidar a los soviéticos los efectos y se producen muchas iniciativas contra la producción de bombas y las pruebas de las mismas. En 1946 se constituye el Comité de emergencia de científicos atómicos, destinado a recaudar fondos para causas antinucleares, constituido por Einstein, Urey, Bethe, Morse, Pauling, Seitz, Weisskopf, Szilard etc. Cuando los soviéticos hicieron explotar su propia bomba en 1949 Teller y Lawrence apoyaron ante el gobierno la idea de producir una bomba

más poderosa, la de hidrógeno. También hubo científicos, como Oppenheimer, director científico del proyecto Manhattan, se opusieron a su producción.

En estos años, la oposición sigue a cargo de científicos importantes, que denuncian los peligros de la proliferación nuclear y señalan que esas armas amenazan la existencia de la humanidad: manifiesto de Einstein y Russell de 1955, apoyado, entre otros, por Pauling, Born y Bridgman; el manifiesto del grupo de Göttinga de 1958 promovido por Born; las conferencias Pugwabs convocadas por iniciativa de Russell (que las presidió entre 1957 y 1970), Einstein y Frederic Joliot-Curie a partir de 1958; Pauling, Bethe y otros denuncian la radiación en la atmósfera producida por las pruebas.

En consecuencia, el FBI (Federal Bureau of Investigation) abrió dossiers a Einstein, Urey (Nobel de Química en 1934), Weisskopf (fundador de la *Union of concerned scientists* y director del CERN), Szilard y muchos otros. A Edward Condon se le negó el pasaporte en 1945 y tuvo que testificar ante el Comité de Actividades Antiamericanas. Oppenheimer se opuso, como hemos dicho, a la producción de una bomba H y, por eso, la *Atomic Energy Commission*, tras un proceso que recordó el de Galileo y en el que testificó Teller en su contra, lo apartó en 1954 de sus cargos e investigaciones al declararlo un riesgo para la seguridad nacional (se pueden leer fragmentos en Kipphardt, 1966). A Pauling, Premio Nobel de Química de 1954, se le retiró el pasaporte en 1952 por su participación en campañas contra las armas nucleares y por su libro *No more war*. Esto le convirtió en una de las pocas personas que han vuelto a recibir un segundo Premio Nobel, el de la Paz de 1962. Frédéric Joliot-Curie fue nombrado por De Gaulle en 1945, Alto Comisionado para la Energía Atómica. En el 1948 supervisó la construcción del primer reactor atómico francés. En 1950, en pleno auge de la guerra fría, el Primer Ministro Bidault le destituyó como Alto Comisionado y unos meses más tarde (1951) también fue destituida Irène Joliot-Curie de la Comisión. Andrei Sajarov, en la década de los 1960 jugó un activo papel contra la proliferación de armas nucleares y de las pruebas nucleares en atmósfera. En 1968 se le prohibió investigar en los centros y laboratorios de la URSS y se le desposeyó de los honores adquiridos. En 1975 le fue otorgado el Premio Nobel de la Paz, no se le permitió salir de la URSS, y fue su mujer la encargada de recogerlo. David Bohm, autor de una investigación sobre protones y deuterones útil para el Proyecto Manhattan, por lo que no le permitieron defender su tesis, aunque se le concedió el doctorado en 1943. Hubo de comparecer en 1949 ante el Comité. Al negarse a declarar fue acusado de desacato al Congreso. No se le renovó su contrato en la Universidad de Princeton y no encontrando trabajo en ninguna otra, tuvo que ir en 1951 a São Paulo. Leite Lopes, físico y autor de *La ciencia y el dilema de América Latina: dependencia o liberación*, fue despedido por la Dictadura Militar en 1969 del Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) que él había fundado y exiliado en EEUU hasta 1974, pero

cuando queda en evidencia la colaboración de Estados Unidos con el golpe militar se muda a Francia al *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) hasta 1989. En la medida en que estos científicos aplicaron el pensamiento crítico a las concepciones establecidas sobre los armamentos se vieron involucrados en problemas con el poder, en este caso el estado. Otros simplemente por sus ideas de izquierdas, como Bohm o por ser críticos con la situación de la ciencia en su país como Leite Lopes. Esto nos muestra que la ciencia es metodológicamente crítica, pero para que se pueda considerar como pensamiento crítico tiene que salir de las “paredes del laboratorio” e incidir en cuestiones sociales, lo que puede implicar enfrentamientos con el poder dominante en cada época: religioso, político, económico. (SOLBES, 2013a; SOLBES; TORRES, 2013)

*P: En vista de la oposición de los científicos, se trataba de convencer a la opinión pública, mediante campañas como la de “átomos para la paz”, iniciada en 1954 por Eisenhower, que la investigación nuclear realizaba contribuciones no bélicas. Busca información sobre cuándo se pone en marcha la primera central nuclear productora de electricidad ¿Qué nos indica este dato sobre la campaña?*

C: El primer reactor nuclear lo inventa Fermi, en el marco del proyecto Manhattan. Los primeros reactores, fueron el estadounidense de Hanford (1944) y el anglo-francés de Chalk River (Canadá) de 1947. Su finalidad básica era la producción de material fisionable (plutonio), que se usó en la bomba de Nagasaki (1945). Era una alternativa por si fallaba el enriquecimiento de uranio, que se usó en la bomba de Hiroshima. De ahí, la gran preocupación actual de que algunos países, como Irán, puedan tener una central nuclear. En 1955 entró en servicio el primero de una serie de submarinos de propulsión nuclear, el Nautilus. Pero hasta 1956, once años después de Hiroshima y dos años después del inicio de la campaña propagandística, no se pone en marcha la primera central nuclear productora de electricidad en Calder Hall (Gran Bretaña) y en 1957 la de Shippingport (EEUU). Hasta 1966 RU era el mayor productor de energía nuclear mundial. Incluso Walt Disney colaboro activamente en la campaña con el film “Nuestro amigo el átomo”, muy didáctico, con la brillante metáfora entre el genio y el núcleo atómico, pero con un evidente carácter propagandístico, pues afirma que cualquier problema se puede solucionar con la energía nuclear, dentro del enfoque tecnocrático de que cualquier problema humano puede resolverse con tecnología.

## Las centrales nucleares: sus repercusiones y riesgos

*P: ¿Cuál es el esquema de funcionamiento de una central nuclear?*

C: Una central nuclear es básicamente una máquina térmica. Consta de una caldera, el reactor nuclear, en el que se controla la reacción utilizando barras de control que

absorben neutrones y mantienen su producción muy próxima a un neutrón por fisión. Esta calienta un fluido, normalmente agua, que hace girar una turbina, que a su vez hace girar bobinas entre imanes, lo que genera, según la ley de Faraday, una corriente eléctrica. Por último, el líquido se refrigera con torres de evaporación y con el agua de ríos o mares (por eso las centrales se construyen al lado de los mismos). El medio utilizado para hacer girar las bobinas sirve para denominar las centrales eléctricas existentes, tanto las más usuales (térmica, hidroeléctrica, nuclear) como las alternativas (eólicas, geotérmicas, mareomotrices, solares térmicas etc.). Como en todas las máquinas térmicas su rendimiento, el cociente entre el trabajo producido y el calor suministrado es bajo: en las máquinas más eficientes es menor del 30%.

T: Conviene señalar que con el olvido de Chernobil y el problema del calentamiento global, había ido calando en la opinión, particularmente entre los estudiantes de físicas, químicas etc. e incluso en ecólogos como Lovelock, la necesidad de construir nuevas centrales nucleares. Por eso, les presentamos a los estudiantes los argumentos que aparecen usualmente en los medios de comunicación y les pedimos que los pongan en cuestión. (SOLBES, 2013b)

*P: Algunos señalan que las centrales nucleares pueden ayudar a frenar la producción mundial de CO<sub>2</sub>. Otros que es una energía muy difundida, con más de 430 reactores en funcionamiento que producen ya alrededor del 17% del total de la electricidad en el mundo, tanta como la que proviene de la energía hidroeléctrica. Frente a esto, el número de accidentes es bajo y, en consecuencia, se puede afirmar que es una energía segura. Además, afirman que es barata y que la dosis de radiación anual en las proximidades de una central es inferior a la ambiental. ¿Puedes cuestionar con pruebas científicas estos argumentos?*

C: La afirmación de que las centrales evitan la producción de CO<sub>2</sub> es falsa, porque se centra sólo en la etapa de funcionamiento de la central, olvidando que su construcción, y sobre todo el enriquecimiento y transporte del Uranio consume mucha energía eléctrica y combustibles, por tanto, produce CO<sub>2</sub>. También lo produce en abundancia el desmantelamiento de la central y el transporte de los residuos. Y, por otra parte, el uranio es un recurso no renovable. Según cual sea el consumo, se barajan escenarios de agotamiento entre 2030 y 2070.

Sostener que el coste del kw-h nuclear es muy barato también es una falsedad que olvida el apoyo gubernamental a esta energía y que se basa en la misma falacia que el punto anterior, considerar sólo la fase de funcionamiento. Pero si se incluyen todos los costes del proceso, incluyendo enriquecimiento del uranio, construcción y desmantelamiento de la central (que es toda ella un residuo radiactivo) y el almacenamiento de los residuos, que es financiado por los contribuyentes, ya no resulta tan barata.

La idea de que los adelantos tecnológicos y la experiencia en el uso de las centrales nucleares hacen que la seguridad sea cada vez mayor, olvida la gravedad de los tristemente famosos accidentes de Three Mile Island en EEUU (1979), de nivel 5, Chernóbil (1986) y de Fukushima (2011), ambos de nivel 7 (el máximo). El primero sin víctimas mortales, pero con una nube radiactiva de unos 30 km<sup>2</sup> que obligo a desplazar a unas 25.000 personas y a un costoso proceso de limpieza que duró diez años. En el de Chernóbil fueron arrojadas a la atmósfera unas 200 toneladas de material radiactivo (equivalente al de 500 bombas atómicas como la de Hiroshima), causó directamente la muerte de 31 personas, forzó al gobierno de la Unión Soviética a la evacuación de unas 135.000 personas y provocó una alarma internacional al detectarse radiactividad en diversos países de Europa septentrional y central. El gobierno ocultó la catástrofe las primeras dos semanas y mintió informando que había sucedido un accidente nada alarmante en la central. 1.000 personas recibieron 0,5 Sv<sup>1</sup>, 20.000 cerca de 0,25 Sv, 200.000 personas recibieron alrededor de 0,1 Sv. En total, 600.000 personas recibieron dosis de radiación por los trabajos de descontaminación posteriores al accidente. 5.000.000 de personas vivieron en áreas contaminadas y 400.000 en áreas gravemente contaminadas.

Pero se han producido muchos otros accidentes no tan conocidos por el público. Así, Wikipedia menciona muchos accidentes nucleares civiles graves, algunos de los cuales han obligado a cerrar centrales nucleares, como Vandellós I (España) en 1989, de nivel 3, el de Windscale (RU), un reactor para producir plutonio en 1957, de nivel 5, o el accidente de Goiânia (Brasil) en 1987, que causa 4 muertos y 249 heridos, por envenenamiento por radiación de una fuente radiactiva médica de cesio-137 en desuso robada de un hospital abandonado, de nivel 5.

Tampoco se contabilizan los accidentes nucleares militares en tiempos de paz como la colisión de dos aviones B-52 y KC-135 de los Estados Unidos, que perdieron cuatro bombas nucleares frente a las costas de la ciudad española de Palomares en 1966, cuyas secuelas aún están sin resolver o los submarinos soviéticos K-8 (en el golfo de Vizcaya), K-431 (explosión del reactor y dispersión de los productos radiactivos por las corrientes oceánicas) y K-219 (una explosión produjo su hundimiento en el Atlántico). En total, hay 8 submarinos nucleares hundidos en el mundo (2 de EEUU, 4 de la antigua URSS y 2 de Rusia).

Hay todavía otros accidentes que regímenes dictatoriales consiguieron mantener en secreto. La explosión en la central secreta de Mayak, (URSS), de nivel 6, causa 200 muertos y contamina 90 km<sup>2</sup> con estroncio. Un total de 10.000 personas fueron evacuadas y decenas de miles quedaron expuestas a la radiación. También la fuga de unos 700 l de desechos de alta radiactividad del Centro de Energía Nuclear de Madrid (España) en 1970 al Río Manzanares, afluente del Río Tajo, que desemboca

---

1 Sievert (Sv) es una unidad que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los efectos biológicos producidos. 1 Sv es un Jkg<sup>-1</sup>.



en Lisboa (Portugal), produciéndose la más grave contaminación radiactiva de la historia de España, oculta por la dictadura de Franco y sólo desvelada más de 20 años después, con lo cual no ha podido ser evaluada. (YARNOZ; YOLDI, 1994)

Los problemas son tan graves que no hay empresa aseguradora (ni consorcio de las mismas) que quiera hacer pólizas a las centrales. Aún más, si se tienen en cuenta que éstas pueden ser objeto de atentados terroristas, como el que obligó a cerrar y desmantelar Lemóniz I y II en el País Vasco, cuando habían finalizado las obras y tan sólo faltaba la introducción del combustible nuclear, costando ese proceso unos 6.000 millones de euros.

También se dice que las centrales son poco contaminantes o que producen menos contaminación radiactiva que la propia naturaleza. Esto se basa en el funcionamiento normal, olvidando los accidentes de distinta gravedad que producen emisiones y que los productos radiactivos naturales tienen masas elevadas y, por tanto, son difícilmente asimilables, salvo el radón que se inhala. Pero los elementos radiactivos fruto de las reacciones de fisión, como el estroncio 90, el cesio 137 o el yodo 131, tienen masas intermedias, con lo cual son asimilados con facilidad por los seres vivos, entrando en la cadena alimentaria. (ROTHMAN, 1980) Así, el I-131 se concentra en la tiroides y, para evitarlo, se suministró yodo a la población después de Fukushima. En cuanto a los residuos y la seguridad de los almacenamientos es un tema no resuelto, por eso nunca se menciona. Entre 1963 y 1983 se vertieron más de 140.000 toneladas de residuos radiactivos en la fosa atlántica, a 700 km de Galicia. Cuando Cousteau mostró fotografías de los “seguros” bidones abiertos, se prohibió esta actividad. Ahora se ha optado por el Almacén Temporal Centralizado (ATC) en Francia y Reino Unido y, recientemente, en España, concebidos para unos 100 años. Solo EEUU dispone de un Almacén Geológico Profundo (AGP) destinado a residuos militares. Conviene recordar que en el combustible gastado de los reactores se encuentran sustancias como el plutonio 239 (vida media de 24.400 años), el neptunio 237 (vida media de 2.130.000 años) y el plutonio 240 (vida media de 6.600 años). Se supone que el almacenamiento de estos residuos debe ser garantizado por decenas de miles de años hasta que la radiactividad baje lo suficiente como para que dejen de ser peligrosos, pero la obra humana más duradera (las pirámides) no excede de los 4.500 años.

*P: ¿Qué está pasando en Fukushima? ¿Por qué está siendo silenciado por los medios de comunicación?*

C: Fukushima tiene poca resonancia porque tanto Tokyo Electric Power Company (TEPCO) (la empresa propietaria) como el gobierno como los defensores de las centrales nucleares, trataron de minimizar su gravedad. Pero se trata de una catástrofe absoluta: entre 300 y 400 toneladas de agua radiactiva son vertidas diariamente al Pacífico. Esto ha estado ocurriendo desde hace casi cuatro años. Según ha reconoci-

do TEPCO, en el periodo entre mayo de 2011 y agosto de 2013 se han derramado al océano Pacífico sustancias que representan un total de 20 billones de Bq (becquerel, medida de actividad equivalente a una desintegración por segundo) de cesio 137, 10 billones de Bq de estroncio 90 y 40 billones de Bq de tritio”.<sup>2</sup>

Mycele Schneider, consultor independiente en energía nuclear, señalaba en una reciente entrevista en Rio de Janeiro que “La cantidad de radiactividad que se filtró al agua y a los sótanos se estima en el triple de la que se liberó tras el accidente de Chernóbil”, es decir el equivalente a 1.500 bombas como la de Hiroshima.<sup>3</sup>

*P: Se puede decir que como Brasil sigue creciendo la demanda por energía, tiene la sexta mayor reserva de uranio en el mundo y también la tecnología necesaria para la fabricación de combustible nuclear, y como sólo tiene una Central nuclear Almirante Álvaro Alberto, en Angra dos Reis, Río de Janeiro, con dos Reactores de Agua Presurizada (PWR): Angra I, con 626 MW, se conectó a la red en 1982 y Angra II, con 1275 MW, conectado en 2000, esto asegura un papel importante de las plantas nucleares.*

C: Aunque en Latinoamérica haya pocas centrales nucleares: los 2 reactores mencionados en Brasil, 3 Argentina (Atucha I y II, en Lima, a 100 km de Buenos Aires, y Embalse, en la provincia de Córdoba), y 2 en México (Laguna Verde I y II en Punta Limón, Veracruz), eso no quiere decir que sean necesarias más.

Hacerlo sería olvidar los problemas que conlleva la fisión nuclear (producción de residuos radiactivos de gran duración y, en consecuencia, de difícil almacenamiento, así como de materiales fisibles reutilizables en armamento nuclear y la posibilidad de accidentes nucleares de gran magnitud) vistos en las actividades anteriores. Se olvida así mismo que la casi totalidad de la energía de nuestro planeta procede del Sol. Por tanto, parece que las únicas soluciones pasan por el ahorro y la eficacia en el uso de la energía y por el aprovechamiento de la energía del Sol, es decir, por las energías renovables. Son energías que agotan menos recursos y que tienen un impacto ambiental más bajo que las convencionales. Las más utilizadas en la actualidad son la biomasa y la hidroeléctrica. Pero también está la energía eólica o la solar. La energía solar es un término confuso porque incluye gran cantidad de dispositivos que sólo tienen en común la utilización directa de la luz del Sol. Podemos mencionar los paneles solares (que suministran agua caliente para uso doméstico), la arquitectura solar, que permite reducir considerablemente los gastos en calefacción, refrigeración e iluminación de las casas simplemente mediante el diseño adecuado de las mismas, los hornos solares (que concentran los rayos solares con espejos para producir elevadas temperaturas), las centrales electrosolares (grandes hornos solares, que calientan un fluido que acciona turbinas y generadores) y las células solares

---

2 Ver em: <<http://www.rebellion.org/noticia.php?id=196316>>.

3 Ver em: <<http://www.ipsnoticias.net/2014/06/fukushima-es-un-desastre-que-no-termino/>>.

fotovoltaicas, construidas a partir de semiconductores, como el silicio, que transforman directamente la luz en electricidad. (SAPIÑA, 2006; SOLBES, 2002)

En la tecnología algunos autores distinguen entre tecnologías autoritarias y democráticas (MUNFORD, 1992) o de tecnologías pesadas e ingobernables y livianas y flexibles. (WINNER, 1987) Y esto sucede a un nivel muy amplio, en la producción, en la energía, el transporte etc. Así, en la producción de energía se opta por unidades complejas y centralizadas (nucleares, térmicas) frente a las reducidas y descentralizadas (solares, eólicas). Incluso en el caso de la solar se financian proyectos faraónicos (mediante satélites o grandes superficies de heliostatos) cuando se trata de la energía más fácil de adaptar al consumo inmediato: a través de placas solares, células fotovoltaicas etc. En transporte también se opta por unidades de alto consumo energético (por persona o tonelada de mercancía transportada) frente a las de bajo, por lo privado frente a lo público. Es decir, para el transporte de personas se opta por el automóvil, el autobús, el avión (que sólo es rentable para grandes distancias) en vez del tren, el tranvía, el metro. Para el de mercancías se opta por el camión en lugar del tren o el barco. (SAPIÑA, 2006; SOLBES, 2002)

Esto no quiere decir que haya que cerrarlas todas inmediatamente, porque pueden facilitar una transición hacia las renovables, pero cuestiona la construcción de otras nuevas. Tampoco plantea el abandono de los isótopos radiactivos en sus múltiples aplicaciones médicas, industriales etc.

## Consideraciones finales

Este tema con el enfoque usual de la enseñanza de la física se limitaría a unos conceptos básicos como isótopo, curva de energía de enlace, reacción de fisión y fusión, entre otros. Sin embargo, un enfoque de pensamiento crítico mediante cuestiones socio-científicas nos permite abordar temas como:

- Los armamentos nucleares y sus consecuencias (el complejo militar-industrial, los tratados entre países durante la Guerra Fría, la contaminación radiactiva fruto de las pruebas, los accidentes nucleares);
- La responsabilidad de los científicos en la construcción de las bombas pero también en su rechazo y el precio que pagaron por este último;
- Los reactores nucleares, siendo conscientes de sus riesgos y repercusiones.

En resumen, el uso de las CSC de modo interdisciplinar por los profesores de física contribuye a la educación CTS y al reto de una educación científica crítica que implica dar sentido al aprendizaje de los contenidos científicos inmersos en cuestiones sociales, ambientales, económicas y políticas, dejando de lado nociones ingenuas y lineales en el aprendizaje de la física.

Finalmente señalamos que dado su carácter multidimensional la CSC relatada puede dar lugar al estudio de cuestiones éticas, no solo con respecto a los seres humanos, en que importan mucho las implicaciones en la salud, pero también acerca de la utilización de o la implicación sobre otros organismos vivos. Así esto daría apertura a otro enfoque sobre la CSC, por ejemplo, incluyendo la manipulación de animales con experimentos de radiación, las implicaciones ecológicas, la pérdida de biodiversidad. (IAEA, 2002) Así mismo, es conveniente dar apertura al uso de objetos virtuales como lo señalan Chang, Wu e Hsu (2013) para simular escenarios reales de las CSC estudiando como esto contribuye a efectuar experiencias de aprendizaje del contenido de la ciencia y la toma de decisiones informadas.

## Referencias

- BELL, R. Los cobayas humanos del plutonio. *Mundo científico*, Barcelona, n. 15, p. 510-520, 1995.
- BORN, M. *La responsabilidad del científico*. Barcelona: Labor, 1968.
- BOWLER, P. J.; MORUS, I. R. *Panorama general de la ciencia moderna*. Barcelona: Crítica, 2005.
- CHANG, H.-Y.; WU, H.-K.; HSU, Y.-S. Integrating a mobile augmented reality activity to contextualize student learning of a socioscientific issue. *British Journal of Educational Technology*, v. 44, n. 3, p. e95-e99, 2013. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8535.2012.01379.x>>. Acceso en: 23 oct. 2015.
- FRAYN, M. *Copenhagen*. Londres: Methuen, 2000.
- HEWITT, P. *Física conceptual*. México: Pearson Education, 2004.
- IAEA. *Ethical considerations in protecting the environment from the effects of ionizing radiation*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.
- JEROME, F. *El expediente Einstein*. Barcelona: Planeta, 2002.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M. P. *10 ideas clave: competencias en argumentación y uso de pruebas*. Barcelona: Graó, 2010.
- KIPPHARDT, H. *El caso oppenheimer*. Barcelona: Ayma, 1966.
- KRAGH, H. *Generaciones cuánticas*. Madrid: Akal, 2007.
- RAMÍREZ MARTÍN, J.; FERNANDEZ-RAÑADA, A. *De la agresión a la guerra nuclear: Rotblat, Pugwash y la Paz*. Oviedo: Nobel, 1996.
- MUNFORD, L. *Técnica y civilización*. Madrid: Alianza, 1992.
- ROTHMAN, H. *La barbarie ecológica: estudio sobre la polución en la sociedad industrial*. Barcelona: Fontamara, 1980.
- SALAM, A. Defensa nuclear, desarme y desarrollo. *Revista de Enseñanza de la Física*, Córdoba, v. 2, n. 1, p. 25-35, 1986.

- SÁNCHEZ RON, J. M. *El mundo después de la revolución*. Barcelona: Pasado y Presente, 2014.
- SÁNCHEZ RON, J. M. *El poder de la ciencia*. Madrid: Crítica, 2006.
- SAPIÑA, F. *El reto energético*. València: Publicacions Universitat de València, 2006.
- SOLBES, J. Contribución de las cuestiones socio-científicas al desarrollo del pensamiento crítico (I): introducción. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, Puerto Real, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2013a. Disponible en: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/34997>>. Acceso en: 23 out. 2015.
- SOLBES, J. Contribución de las cuestiones socio-científicas al desarrollo del pensamiento crítico (II): ejemplos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, Puerto Real, v. 10, n. 2, p. 171-181, 2013b. Disponible en: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/34992>>. Acceso en: 23 out. 2015.
- SOLBES, J. *Les empremtes de la ciència. Ciència, tecnologia, societat: unes relacions controvertides*. Alzira: Germania, 2002.
- SOLBES, J.; TORRES, N. Y. Análisis de las competencias de pensamiento crítico desde el abordaje de las cuestiones sociocientíficas: un estudio en el ámbito universitario. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, Valencia, n. 26, p. 247-269, 2012. Disponible en: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/25687>>. Acceso en: 23 oct. 2015.
- SOLBES, J.; TORRES, N. Y. ¿Cuáles son las concepciones de los docentes de ciencias en formación y en ejercicio sobre el pensamiento crítico? *Tecné, Episteme y Didaxis*, Bogotá, n. 33, p. 61-85, 2013. Disponible en: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/35214>>. Acceso en: 23 oct. 2015.
- SOLBES, J.; VILCHES, A. STS interactions and the teaching of physics and chemistry, *Science Education*, New York, v. 81, n. 4, p. 377-386, 1997. Disponible en: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/36290>>. Acceso en: 23 out. 2015.
- TIPLER, P. A. *Física moderna*. Barcelona: Reverté, 2003.
- VOLPI, J. *En busca de Klingsor*. Barcelona: Seix Barral, 1999.
- YARNOZ, C.; YOLDI, J. Los informes secretos del accidente nuclear de Madrid. *El País*, Madrid, 24 oct. 1994. Disponible en: <[http://elpais.com/diario/1994/10/24/sociedad/782953223\\_850215.html](http://elpais.com/diario/1994/10/24/sociedad/782953223_850215.html)>. Acceso en: 23 oct. 2015.
- WALKER, M. La Física bajo el tercer Reich. *Mundo científico*, Barcelona, n. 145, p. 324-332, 1994.
- WEISSKOPF, V. F. *La física en el siglo XX*. Madrid: Alianza, 1990.
- WIKIPEDIA: La enciclopedia libre. *Energía de enlace nuclear*, [S.l.], [2015]. Disponible en: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_de\\_enlace\\_nuclear](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_de_enlace_nuclear)>. Acceso en: 23 oct. 2015.
- WINNER, L. *La ballena y el reactor*. Barcelona: Gedisa, 1987.