



RIDAA
Repositorio Institucional
Digital de Acceso Abierto de la
Universidad Nacional de Quilmes



Universidad
Nacional
de Quilmes

Schoijet, Mauricio

La energía nuclear de fusión : aspectos históricos



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 2.5
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/>

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

Cita recomendada:

Schoijet, M. (2005). *La energía nuclear de fusión: aspectos históricos*. *Redes*, 11(22), 177-207. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/596>

Puede encontrar éste y otros documentos en: <https://ridaa.unq.edu.ar>

LA ENERGÍA NUCLEAR DE FUSIÓN: ASPECTOS HISTÓRICOS

MAURICIO SCHOIJET*

RESUMEN

La posibilidad de la fusión nuclear controlada se planteó desde la década de 1940 como una posible fuente ilimitada de energía, y los primeros experimentos se realizaron en Estados Unidos en 1951. Se ha convertido en una gran empresa de desarrollo tecnológico en varios países, poco conocida por el público. Han aparecido en este caso efectos nunca previamente registrados para ningún otro sistema tecnológico, en cuanto a la necesidad de máquinas de tamaños extremos, luego con muy altos costos, para poder probar su viabilidad científica, lo que aún no se ha logrado. El horizonte de tiempo para su operación comercial, que en la década de 1950 se creía factible en veinte años, medio siglo después se ha extendido hasta mediados del siglo XXI, con lo que resultaría el sistema tecnológico en que se habría presentado el mayor tiempo entre los primeros experimentos y la operación comercial, lo que desmiente ideas convencionales acerca de la aceleración del progreso científico y tecnológico. Sugiero que la persistencia de la comunidad científica implicada en la investigación y desarrollo de la fusión nuclear, a pesar de las enormes dificultades, representaría una forma de comportamiento irracional.

PALABRAS CLAVE: FUSIÓN, NUCLEAR, IMPREVISIBILIDAD, INVIABILIDAD, IRRACIONALIDAD.

POR QUÉ OCUPARSE DE LA FUSIÓN NUCLEAR

La cuestión de la energía nuclear de fusión implica una problemática de importancia histórico-universal, que muy pocos perciben. La visión de la evolución de la tecnología que tiene la parte mejor informada del público, incluso en los países desarrollados, es irreal. Es vista como una cadena ininterrumpida de éxitos. Y en efecto, han sido muy impresionantes, desde el transistor al láser y a la computadora, las armas nucleares, la biotecnología y los misiles guiados.

* Departamento El Hombre y su Ambiente. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.

Pero hay una parte nada pequeña de esta historia, la de los fracasos, que permanece casi completamente invisible. Se han dado no sólo pero sí mayormente en el área más impulsada por las fuerzas sociales dominantes, en todo el mundo, en el capitalista y el del “socialismo realmente existente” ahora en proceso de extinción. En ambos se invirtieron enormes recursos humanos y materiales en sistemas de gran tamaño, alta complejidad y condiciones físicas extremas. Muchos, por supuesto, conocemos el caso del avión Concorde. Pero tenemos que poner en la lista de fracasos, o fracasos muy probables, a varios más, tales como los proyectos de desalinación masiva del agua de mar y la explotación de minerales de los fondos marinos; el reactor rápido de cría; los misiles MX, y la así llamada Guerra de las Galaxias. Al afirmar lo anterior no niego la posibilidad de que algunos puedan resurgir en el futuro.

En el caso de la energía nuclear convencional de fisión no se puede aún confirmar su fracaso definitivo, pero las señales apuntan en esa dirección. Para percibir la magnitud de éste, hay que tomar en cuenta que se trató de una tecnología apoyada por todos los gobiernos, a partir del Programa de Átomos para la Paz, lanzado por el presidente Eisenhower en 1953, y de la subsecuente creación del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) y que a nivel internacional se planteó además que sería un elemento fundamental para que los países menos desarrollados pudieran avanzar hacia el desarrollo; que se trató de una tecnología enormemente subsidiada, y que los aparatos del Estado jugaron un papel central en vencer la resistencia de la industria eléctrica privada, en el caso de Estados Unidos (Lowen, 1987); y que en este momento se encuentra en una situación de parálisis y retroceso en todos los países desarrollados, con la excepción de Japón, y en la mayor parte de los menos desarrollados. Contrariamente a las proyecciones del OIEA, que preveían cinco mil reactores comerciales operando para el año 2000, y que ahora pueden verse como totalmente irrealistas, sólo se llegó a 400 reactores en operación y está retrocediendo. En los diez años anteriores a 1999 fueron clausurados once reactores en Estados Unidos por razones económicas (David Lochbaum, de Union of Concerned Scientists, 1999). Actualmente se da un rápido avance de una energía ambientalmente benigna como la eólica, cuya capacidad instalada está aumentando más rápidamente que la de la nuclear, y que como todas las de este tipo fueron ninguneadas por casi todos los gobiernos.

No se trata de fracasos pequeños, sino muy grandes, varios de ellos a costos que varían entre los miles de millones y centenares de miles de millones de dólares.

Dentro de la historia de estos fracasos, se puede intentar una tipología. Hay casos de sistemas que fracasan o tienen un desarrollo muy modesto,

lejos de las expectativas iniciales; o parecen encaminados hacia el fracaso, después de haber sido completamente desarrollados y de una considerable etapa de operación comercial. Entre los últimos están la energía convencional de fisión, el misil MX, y el avión Concorde. Otros son abandonados por las grandes dificultades que presentan antes de llegar a funcionar, o antes de pasar a una etapa de desarrollo final. Sería el caso del reactor de cría y la Guerra de las Galaxias. El caso de la energía nuclear de fusión es un caso intermedio, en que décadas de investigación y desarrollo no logran siquiera probar su factibilidad científica, y se produce una situación que podríamos llamar de parálisis. A pesar de inversiones muy considerables la meta parece cada vez más lejana. Han habido afirmaciones ridículas, por ejemplo en un artículo publicado en la revista de divulgación *La Recherche*, de una “carrera” hacia la fusión, en circunstancias en que efectivamente siguen produciéndose algunos avances científicos, pero en que hay un estancamiento en el sentido de que éstos no representan un acercamiento importante hacia la verificación de su factibilidad científica.

Es además el caso de una gran empresa de desarrollo tecnológico que permanece virtualmente invisible para el público. En efecto, la prensa le dedica muy poca atención, incluso en los países desarrollados. Los muy pocos artículos de alguna extensión los publican revistas especializadas como *Chemical Engineering News* o de divulgación científica como *La Recherche*. Las escasas discusiones quedan confinadas a la comunidad de los físicos en una revista como *Physics Today*. En México, el único texto de alguna extensión publicado sobre el tema sería la reproducción de una entrevista al físico Boris Kadomtsev, uno de los líderes del programa soviético, publicada en la revista *Novedades de Moscú* en 1976 y reproducida en el periódico *El Día*; y más recientemente el libro de Julio Martinell, publicado en 1993. Merece una mención especial por el hecho de ser uno de los muy pocos publicados en nuestro idioma y porque presenta no sólo la ambigüedad y el irrealismo extremo que también se encuentran en otros autores, sino un cierto tremendismo (¡sin la energía nuclear de fusión sería imposible mantener la civilización!), y por el hecho de mantener su irrealismo en una fecha tan tardía, con carencia de percepción de los aspectos técnicos ya mencionados, y de los históricos y económicos.

Presenta un enfoque particularmente sesgado del problema, ya que está centrado en aspectos puramente científicos, por ejemplo sobre propiedades de los plasmas, con ausencia notoria de otros tecnológicos o científico-tecnológicos muy importantes, por ejemplo en lo referente al tamaño de los reactores, es decir la aparente imposibilidad de construir reactores de fusión de escala menor a la de los más grandes dispositivos convencionales o nucle-

ares de generación, y la necesidad de cambiar las paredes de éstos en pocos años debido al deterioro por radiación.

Desde el punto de vista de la historia y la política de la tecnología, el caso de la energía nuclear de fusión ha sido muy poco estudiado. Sobre la energía nuclear de fisión se han publicado centenares de libros, muchos de ellos desde un punto de vista crítico, y seguramente miles o decenas de miles de artículos. Sobre la energía nuclear de fusión sólo conozco un libro, el de Joan L. Bromberg, sobre la historia de la investigación en fusión en Estados Unidos hasta aproximadamente 1980. También hay un libro de John Wesson (*The Science of JET*), que reseña las realizaciones científicas de los científicos e ingenieros en un laboratorio, el del Joint European Torus, para el período 1973-1999. Se han publicado varios artículos de revisión sobre el tema, en general casi totalmente acrílicos, en compilaciones sobre la problemática energética. Conozco un solo artículo crítico sobre este tema, de Lawrence Lidsky, publicado en *Technology Review*, al que me referiré más adelante.

En este artículo trataré de defender cuatro tesis. La primera es que éste sería un caso paradigmático que desmiente las suposiciones convencionales sobre la aceleración del progreso científico y tecnológico y sobre la omnipotencia de la ciencia y la tecnología, que fueron dominantes entre científicos, ingenieros y economistas durante un período prolongado.

Segunda, que aunque no se trata del único sistema para el que aumentaron los costos y se prolongaron los plazos para lograr un objetivo de alta tecnología, y que la historia de la predicción tecnológica está llena de fracasos, que en general representan o representaron una refutación práctica de predicciones optimistas, sugiero que éste es un caso extremo, ya que no ha habido ninguno de esta magnitud y en cuanto a los aludidos plazos y costos.

Tercera, que la comunidad científica y tecnológica implicada en la investigación y desarrollo en este terreno muestra señales de un comportamiento irracional. Y finalmente, planteo una generalización para este caso de una tesis presentada hace medio siglo por Anthony Cliff, sobre el papel de la carrera armamentista como instrumento que, al tiempo que implica un derroche de recursos, contribuye a la estabilidad económica.

Este artículo está escrito desde el punto de vista del ambientalismo radical, inspirándose en trabajos tales como *Límites del crecimiento* (Meadows, 1972) y *Comunismo sin crecimiento* del filósofo marxista alemán Wolfgang Harich (1975), que implican posiciones que por ahora son minoritarias y contrarias a la mayor parte de los autores que han publicado sobre la temática de la energía. Este enfoque plantea soluciones radicalmente diferentes a las propuestas dominantes en los estudios sobre energía. No se trata de hacer solamente un análisis de los aspectos técnicos y económicos, sino también a

los relativos a la sociología de la ciencia y la tecnología. En este aspecto, tanto la mayoría de los científicos, políticos, periodistas, etc., son espontáneamente positivistas, en pocas palabras: los científicos saben. Contra esta visión, planteo otra que llamaría social-estructural, para la cual hay que ver a las comunidades científicas como sujetas a la influencia de las fuerzas sociales dominantes, a través de los aparatos ideológicos y técnicos del Estado, en que estos últimos también actúan como aparatos ideológicos.

La palabra ideología se usa con varias significaciones. En este caso la uso en el sentido de sistema de errores que cumple una función social. Por lo tanto lo que los científicos saben, o creen saber, y lo que ignoran, está en determinadas coyunturas históricas y para determinadas comunidades científicas, condicionado por esta influencia.

LA FUSIÓN NUCLEAR, LA ILUSIÓN DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA DEL PROBLEMA ENERGÉTICO Y LA SOCIOLOGÍA DE LA CIENCIA

Los programas de investigación y desarrollo tecnológico en energía nuclear de fusión, que comenzaron en 1952 en Estados Unidos, Gran Bretaña y la Unión Soviética, seguramente representan el caso más importante de cooperación internacional en investigación y desarrollo tecnológico. No tengo cifras confiables, pero podemos suponer que han involucrado e involucran a miles de científicos, ingenieros y técnicos, en decenas de laboratorios en siete países que están entre los de mayor poderío militar y económico, es decir, los ya mencionados más Francia, Alemania, Italia y Japón. Tampoco tengo una cifra para los gastos, pero es posible conjeturar que están en el orden de decenas de miles de millones de dólares.

A diferencia del caso de la fisión nuclear, estos programas no han dado resultados prácticos, en lo referente a su objetivo fundamental, es decir, la producción de energía. Sí ha habido resultados de la aplicación de la física de plasmas, que es un aspecto de física básica estrechamente relacionada con el problema, pero que no se derivan de avances en el campo de la fusión, a diversas aplicaciones tecnológicas, reales o potenciales, como la soldadura de plasmas, uso de plasmas para depositar películas delgadas de semiconductores, recubrimientos, cerámicas, lámparas de plasmas, etc. Pero cabe enfatizar que ni siquiera han logrado probar la viabilidad científica de la energía nuclear de fusión. A diferencia de la energía nuclear de fisión, no ha causado ningún tipo de movilizaciones ni controversias políticas, con la excepción de las acciones de un grupo fascista marginal al que me refiero más adelante. Es entonces un área muy poco explorada de la historia de la tecnología, donde se dan fenómenos totalmente nuevos.

Representa el caso del que es probablemente el programa de investigación más ambicioso de la historia de la tecnología, que intenta resolver de manera definitiva el problema energético para las generaciones futuras, utilizando una materia prima supuestamente inagotable. Un programa que registra las más abundantes predicciones tecnológicas fallidas y el caso más espectacular de problemas no anticipados, tanto en tiempos como en costos, contaminación, desechos y consumo de materiales escasos. Y el caso más notorio de caída en deslizamiento hacia la irracionalidad de una fracción importante de lo que llamamos una burocracia técnica de miles de ingenieros y científicos, y de una parte de la comunidad científica de las ciencias “duras”.

Un objetivo de este trabajo es entonces hacer un esbozo de historia de los esfuerzos para lograr la fusión nuclear, para tratar de mostrar que han sido un fracaso en términos de costos versus beneficios, y que ha servido para mostrar que en determinados campos una ideología de omnipotencia de la ciencia, que es una de las formas de la ideología del progreso, que jugó un papel dominante en el desarrollo del capitalismo desde el siglo XVII, llevó a subestimar las dificultades y los problemas no anticipados, que hasta ahora casi no han sido percibidos por el público.

La investigación y desarrollo en la energía nuclear de fusión representa un problema central para una historia teórica de la tecnología, es decir se trata de explicar cómo es posible que ésta continúe a pesar de que la muy considerable inversión y los esfuerzos realizados no han permitido probar ni siquiera su factibilidad científica. Se puede suponer que estamos actualmente más cerca de la meta que en 1970. Pero si en esa época se creía que una planta de demostración estaría funcionando para 1990, y en el año 2002 se propone que lo estará para el 2050, se debe necesariamente suponer que, a pesar de avances en la solución de determinados problemas, también se ha percibido que otros son más difíciles de resolver de lo que se pensaba, y que han aparecido nuevos problemas no anticipados de muy difícil solución.

El otro aspecto del problema tiene relación con la sociología de la ciencia. Es sabido que la ciencia es considerada como un caso paradigmático de racionalidad. Sin embargo, un problema fundamental en esta disciplina es la cuestión de si puede haber comunidades científicas que en determinada coyuntura se comporten de manera irracional, y por cuáles motivos. Algunos sociólogos de la ciencia han estudiado este problema en relación a algunas controversias científicas, por ejemplo Brian Martin y Evelleen Richards para el caso de la fluoridación del agua potable (Martin, 1995). Un caso paradigmático podría ser el de la resistencia de los geólogos durante medio siglo a aceptar la teoría de deriva de los continentes propuesta en

1915 por Alfred Wegener (Stewart, 1990). Éste, que fue documentado por Stewart y otros historiadores de la ciencia, se refería a una controversia puramente científica. Voy a sugerir que en el que nos ocupa, es decir, las derivaciones tecnológicas de la investigación de los fenómenos de fusión nuclear, la resistencia de los científicos y tecnólogos involucrados en la investigación y desarrollo de la energía nuclear de fusión a reconocer la posibilidad de que fracase, o sea que no se logre este objetivo en ningún futuro previsible a pesar de la enorme movilización de recursos humanos y materiales invertidos en esta empresa, representaría una forma de irracionalidad, no casual sino resultado de la influencia de los aparatos ideológicos del Estado. Al afirmar lo anterior no se está negando totalmente la posibilidad de que los programas de investigación y desarrollo en este terreno culminen en el éxito.

Hay dos aspectos que no serán considerados, y la razón es que no se trata de un trabajo que pretenda examinar todos los aspectos de la sociología de la ciencia que tienen relación con la fusión nuclear, sino aquellos que la tienen con la investigación que efectivamente implicó avances en el aspecto científico y tecnológico. El caso de la investigación en fusión por Ronald Richter en Argentina a comienzos de la década de 1950 fue descrito en un excelente libro de Mario Mariscotti, en el aspecto de recuento de los hechos (Mariscotti, 1985). No tiene ningún significado desde el punto de vista científico, sino sólo desde el punto de vista de la historia de la ciencia en Argentina, en tanto que la debilidad de la ciencia y la falta de una cultura científica y tecnológica en la sociedad argentina de esa época permitieron que un personaje totalmente marginal dirigiera un proyecto absolutamente irreal que implicó un gran derroche de recursos.

El otro es el de la fusión fría de Fleischman y Pons, o sea a la temperatura ambiente o cercana a ésta, que se produciría en un proceso electroquímico. Sobre este tema se publicaron varios libros y numerosos artículos periódicos. Esta historia comenzó con una conferencia de prensa de los mencionados en 1989. Varios investigadores trataron de reproducir sus resultados, sin lograrlo. Un libro publicado en 1992 daba la impresión de que se trataba de un asunto terminado, que sólo podía tener interés para los sociólogos e historiadores de la ciencia (Flores Valdés, 1992). El desarrollo posterior de los acontecimientos lo desmintió, ya que se llevaron a cabo diez conferencias internacionales sobre el tema, una con participación de un físico prestigiado como Julian Schwinger, y se publica una revista internacional sobre fusión fría. Sin embargo, la gran mayoría de los físicos sigue siendo escéptica acerca de la existencia del fenómeno.

LOS COMIENZOS: DE BECQUEREL A BETHE

La radioactividad fue descubierta en 1896 por el físico francés Henri Becquerel. Las investigaciones pioneras fueron realizadas en los primeros años del siglo XX por los esposos Pierre y Marie Curie, Ernest Rutherford, Frederick Soddy y otros. Soddy fue el primero en plantear que los fenómenos radioactivos podrían ser controlados y que su control permitiría la disponibilidad ilimitada de energía barata.

La famosa fórmula de Einstein que relaciona masa y energía fue la clave para comprender el origen de las enormes cantidades de esta última que aparecen en los procesos radioactivos. En 1919 el físico inglés James Jeans propuso que la energía generada en las estrellas se originaba en procesos radioactivos, y el mismo año el francés Jean Perrin propuso que la síntesis del helio a partir del hidrógeno producía la que se generaba en el sol. El físico Hans Bethe sugirió, en un artículo publicado en *Physical Review* en 1939, que en el sol se producía la fusión de núcleos de elementos livianos como el hidrógeno y el helio, dando origen a elementos más pesados. También imaginó la posibilidad de construir un reactor nuclear de fusión. Ya durante la Primera Guerra Mundial se vislumbraron las posibilidades militares de este campo de fenómenos.

Actualmente se han desarrollado modelos de las reacciones nucleares que ocurren en el sol. Se cree que se producen en un núcleo central que ocuparía dos terceras partes del volumen, rodeado por una zona convectiva, en la cual las reacciones de fusión ocurren a tasas muy bajas (Phillips, 1992; Jones, 1999).

Los procesos radioactivos observados por los pioneros lo eran de desintegración radioactiva espontánea, en los que núcleos de elementos de átomos pesados perdían parte de su masa para convertirse en otros elementos también pesados, cercanos a los originarios dentro de la tabla periódica. Hacia fines de la década de 1930 Otto Hahn, Lise Meitner y Fritz Strassmann descubrieron la fisión de átomos pesados que se desintegraban con formación de elementos de peso intermedio, y la posibilidad de controlar estos procesos mediante elementos que llamaron moderadores, que desaceleraban los neutrones emitidos. Ello llevó a la construcción del primer reactor nuclear y posteriormente a la fabricación de armas nucleares, que produjeron el genocidio de las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki.

Estos hechos dieron un enorme impulso a la investigación nuclear. Se pensó que el paso siguiente sería la construcción de un reactor de fusión, propuesta que ya mencioné que fue inicialmente formulada por Hans Bethe y retomada posteriormente en 1945 por el físico húngaro Edward Teller, uno de los diseñadores de las primeras bombas nucleares, que también jugó un

papel importante en el desarrollo de la energía nuclear de fisión. Dada la gran abundancia de elementos livianos, que contrasta con la escasez de los pesados fisionables como el uranio, se creyó que la construcción de un reactor de fusión aseguraría una provisión de energía prácticamente inagotable, y que se trataría de una fuente de energía limpia, en contraste con el caso de la fisión, en que se producen elementos radioactivos de alta radioactividad y toxicidad como el plutonio, que perdura durante centenares de miles de años.

Cabe mencionar que la abundancia de los elementos livianos puede dar una idea falsa, por cuanto si bien el hidrógeno es muy abundante, ya que es uno de los elementos que constituyen el agua, el helio lo es mucho menos. Sus fuentes son escasas y los procesos para su separación son complejos. Tampoco son abundantes las reservas de litio, que alcanzan unas 400 mil toneladas en el territorio de Estados Unidos. Si se requieren isótopos del hidrógeno, como el deuterio y el tritio, en efecto se encuentran presentes en el agua de mar, pero el proceso de obtención de éstos es similar a otros procesos de separación de isótopos, por ejemplo el enriquecimiento del uranio, que son costosos tanto en términos económicos como de la energía necesaria. El tritio es un material sumamente escaso, su único uso está en las bombas de hidrógeno, y las existencias mundiales probablemente se encuentren en el orden de decenas o tal vez no más de algunos centenares de kilogramos.

El precedente de la energía nuclear de fisión, en que el período transcurrido entre la concepción científica y la realización práctica fue muy corto, de pocos años, alimentó expectativas optimistas sobre las posibilidades de la fusión.

EL PROBLEMA ENERGÉTICO Y LA ENERGÍA NUCLEAR DE FUSIÓN

Trataré de mostrar que sobre este problema existen dos visiones antagónicas y que la hasta ahora dominante, por lo menos en los gobiernos, organismos de planeación energética, industria energética, etc., sirvió para justificar la inversión de cuantiosos recursos para desarrollar esta alternativa. Sin embargo, la validez de la versión ambientalista radical no es esencial para justificar mis tesis. Éstas serían válidas independientemente de cuál perspectiva es la correcta, incluso si no hubiera solución y eventualmente la humanidad se viera obligada a retroceder por carencia de fuentes sostenibles de energía.

Las primeras advertencias acerca del posible agotamiento de un recurso energético las hicieron respecto del carbón mineral, para los casos de Alemania y Gran Bretaña, el físico germano Rudolf Clausius en la segunda mitad del siglo XIX, y el economista británico Stanley Jevons a comienzos del siglo XX.

Sin embargo, a partir de la década de 1920 se dio una enorme expansión de la producción y del consumo de petróleo, y si bien se formularon advertencias acerca del agotamiento de los recursos petroleros, por ejemplo del geólogo M. King Hubbert desde 1956, para el caso del territorio de Estados Unidos excluyendo a Alaska y Hawai, no fueron tomadas en cuenta sino hasta veinte años más tarde. Se puede afirmar que no hubo una generalización de una percepción en tal sentido, sino hasta el aumento de los precios del petróleo por la Organización de Países Exportadores de Petróleo en 1973.

Esta crisis dio impulso a un desarrollo de los estudios sobre energía y a la publicación de predicciones tanto sobre las futuras necesidades energéticas, como sobre las posibilidades de varios sistemas tecnológicos alternativos. Esta literatura, con muy pocas excepciones, estuvo marcada por una aceptación acrítica de que las altas tasas de crecimiento del consumo energético eran “naturales”, y una condición para que continúe “la civilización tal como la conocemos actualmente”, ignorando que el sistema de transporte, centrado en el automóvil privado, estaba hecho para favorecer el derroche, lo que era facilitado por los precios bajos del petróleo, e ignorando también la posibilidad de sustituir al transporte basado en el automóvil por el transporte público, con ahorro no sólo de energía sino de materiales, disminución de la contaminación y mejora de la calidad de vida. Se podrían citar decenas de libros y artículos que exageraban las futuras proyecciones de la demanda. Esto sirvió como un elemento ideológico utilizado a favor de la energía nuclear, y en particular de la posibilidad de los reactores de fusión, que supuestamente serían factibles a plazos no demasiados largos, y que encarnaban la promesa de la disponibilidad ilimitada de energía. Uno de los textos más recientes dentro de esta literatura es *Global Energy Perspectives*, producido por el Organismo Internacional de Energía Atómica y publicado en 2001 por Cambridge University Press. Éste propone tres escenarios posibles para el futuro consumo de energía. El más bajo propone que aumentaría el 100 por ciento para el año 2050 con respecto a 1990.

A partir de la crisis energética de 1973 el movimiento espontáneo de los consumidores obligó a las empresas automovilísticas estadounidenses a producir automóviles de menor consumo de combustible; muchas empresas manufactureras y comerciales tomaron medidas de ahorro de energía. Gracias a estas acciones se produjo una disminución de las tasas históricas de crecimiento del consumo energético en Estados Unidos y lo mismo ocurrió en otros países industrializados. Mostraron que existía un ancho margen para soluciones diferentes a las propuestas por el gran capital de la industria energética, la automovilística y los aparatos del Estado.

La tendencia dominante en la literatura sobre el problema energético propicia la continuación de las altas tasas de crecimiento del consumo energético, a través del mantenimiento del sistema de transporte basado en el automóvil, y la sustitución de los combustibles fósiles por la energía nuclear de fisión, y eventualmente de fusión. Sostengo que este gran aumento del consumo de energía, que fue consecuencia del petróleo barato y de la generalización del uso del automóvil, ha causado los graves problemas de contaminación tanto en algunas grandes áreas metropolitanas como a nivel global. Que la búsqueda de una solución universal que permita la continuación del modelo actual es no sólo poco aconsejable sino moralmente deleznable, ya que la contaminación causa decenas de miles o centenares de miles de muertes, enfermedades, pérdida de horas de trabajo y empeoramiento de la calidad de vida. Que por lo tanto la línea dominante es incorrecta, y está ideológicamente motivada por el interés de mantener la posición central que ocupan en la economía las empresas automovilísticas y las productoras de recursos energéticos.

Tanto en el caso de la fisión como en el de la fusión, no hay ninguna evidencia de que la promoción de estas alternativas estuviera de alguna manera ligada a alguna percepción de una operación insatisfactoria de la industria eléctrica. En Estados Unidos, el aumento de la productividad en este sector era tres veces mayor al promedio nacional. Pudo haber habido alguna preocupación acerca de una futura escasez de combustibles fósiles, pero como ya lo mencioné, no fue importante sino hasta 1973. Por consiguiente, es difícil pensar que hubiera influido sobre las políticas aplicadas veinte años antes. Los estudios sobre el futuro de la energía que se publicaron en esos años en general llegaban a conclusiones moderadas, y tampoco eran alarmistas para el largo plazo.

PRIMERAS TENTATIVAS DE CONSTRUIR UN REACTOR DE FUSIÓN

Ya aludí a las implicaciones militares de la investigación sobre fusión nuclear. Los procesos de fusión fueron el fundamento de la bomba de hidrógeno, ensayada por primera vez en 1953. Un reactor de fusión también puede servir para producir tritio, isótopo pesado del hidrógeno cuya utilización en la bomba de hidrógeno ya se mencionó. Por ello, en ambos casos, las investigaciones iniciales fueron secretas, situación que se mantuvo en Estados Unidos hasta 1958. En la Unión Soviética comenzó un programa similar en 1952, que se hizo público en 1956. Los británicos también hicieron público su programa a fines de la década.

La información que reseñaré proviene del libro de Joan L. Bromberg (1982), que narra la historia de los primeros treinta años de investigaciones sobre el tema. Según esta autora, durante el período mencionado los gastos del gobierno de Estados Unidos en esta área habrían alcanzado unos dos mil millones de dólares.

A diferencia del caso de la fisión, en que la reacción nuclear se produce en una fase sólida, aunque los productos de fisión incluyen elementos en fase gaseosa, la fusión utiliza un gas ionizado (plasma) a altísimas temperaturas, como las que suponemos que existen en el interior del sol, es decir de decenas de millones, tal vez cien millones de grados centígrados. Como obviamente a esta temperatura el contacto de este gas con las paredes del reactor las fundiría, el físico Lyman Spitzer propuso en 1951 que podría evitarse este contacto a través de un confinamiento magnético del plasma.

Una de las características más notables de la primera época de las investigaciones sobre la energía nuclear de fusión fue que, a pesar del escaso conocimiento que se tenía acerca de un campo de fenómenos tan complejos, existió un desbordante optimismo en las primeras estimaciones sobre las cuestiones de factibilidad, tiempos y costos. Por ejemplo, H. Bhabha, líder de la investigación y desarrollo nucleares en la India, sugirió en 1955 en la Conferencia de Ginebra sobre Usos Pacíficos de la Energía Nuclear que se podría lograr el uso industrial de la fusión en menos de dos décadas (Miyamoto, 1980).

En esa época el estudio de fenómenos tales como los efectos colectivos y la turbulencia en plasmas estaba aún en sus comienzos, o sea que no se sabía si presentarían o no fenómenos de turbulencia, que implican pérdidas de energía, por lo que no se podía decidir la cuestión de si existía una teoría suficientemente desarrollada para guiar el diseño de un reactor. En ese momento no se conocía prácticamente nada sobre plasmas a esas temperaturas, ya que no se habían producido en ningún laboratorio, ni se sabía si sería posible producirlos. A pesar de ello Thomas Johnson, director de la División de Investigación de la Atomic Energy Commission (AEC), organismo a cargo tanto de la investigación y el desarrollo de la energía nuclear como de las armas nucleares, se imaginó que la viabilidad del confinamiento del plasma caliente podría demostrarse en un tiempo muy corto, de tres o cuatro años, y a un costo de no más de un millón de dólares.

Algunos físicos fueron más prudentes. Cálculos teóricos de Martin Kruskal y Martin Schwarzschild sugerían la posible inestabilidad del plasma.

A pesar de ello hubo físicos que plantearon posibilidades optimistas, por ejemplo el citado Spitzer. En 1952 sugirió que si se lograba una temperatura de un millón de grados el problema podría considerarse resuelto, puesto que los

fenómenos debían seguir leyes simples de escala, y que por lo tanto se podría predecir lo que ocurriría para temperaturas cien veces mayores. Las autoridades de la AEC apoyaron esta propuesta, estimando que podría llevarse a cabo en tres años a un costo del mismo orden que el estimado por Johnson, y que si se lograba, de ello se derivarían considerables beneficios económicos. Los avances posteriores demostraron que estaban completamente equivocados.

En 1957 el físico británico John D. Lawson había publicado un importante trabajo teórico en el que planteaba cuáles serían las condiciones en cuanto a parámetros tales como la densidad del plasma y el tiempo de confinamiento para que efectivamente pudiera no sólo producirse la fusión en un reactor (la llamada ignición), sino para que produjera más energía que la necesaria para iniciarla.

Para los primeros experimentos se pensó en utilizar deuterio o una mezcla de deuterio y tritio. Éstos comenzaron en Estados Unidos en 1951. La mayor parte se hicieron en los laboratorios de la AEC, tales como Oak Ridge, Los Alamos, Livermore y Princeton. Dado el carácter secreto del programa las universidades tuvieron muy poca injerencia. Fue fundamentalmente manejado por ingenieros nucleares. Sin embargo, la situación comenzó a cambiar a fines de la década de 1950, ya que varias universidades comenzaron programas de posgrado en fusión nuclear. La empresa General Electric montó un programa de investigación sobre el tema a partir de 1956, también lo hizo la General Atomics, y hacia fines de la década varias otras empresas de generación de energía eléctrica dieron un modesto apoyo.

Hacia fines de la década de 1950 se constató que los plasmas no se comportaban de acuerdo con los modelos teóricos, debido a la aparición de micro-inestabilidades.

Aunque la prensa estuvo muy poco informada, publicó noticias absolutamente exageradas sobre los adelantos que se estarían produciendo. Hacia 1970 ya existían varios reactores experimentales con diferentes configuraciones. Ninguno había logrado producir energía de manera continua, sino que sólo había servido para entender las condiciones físicas que deberían alcanzarse para una operación futura.

Ese año Robert Hirsch tomó el control del programa. Propuso que los presupuestos, que en ese momento eran del orden de decenas de millones, debían aumentar hasta los centenares de millones de dólares anuales, y en 1973 planteó que gracias a ello podría operar una planta de demostración para 1995. A mediados de la década de 1970, a pesar de los considerables esfuerzos realizados, ya estaba claro que la teoría sólo había alcanzado una capacidad limitada para guiar la investigación. Sin embargo, algunos de los requerimientos ingenieriles ya estaban siendo alcanzados

Apenas comenzaban a delinearse los rangos de radioactividad que producirían los diversos tipos de máquinas, cuando la prensa ya anunciaba que la energía nuclear de fusión sería “virtualmente limpia”. Esta apreciación siguió siendo propagada por lo menos hasta fines de la década. Investigaciones posteriores se encargaron de desmentirla totalmente.

Una de las más importantes motivaciones del programa era la competencia con la Unión Soviética. El banquero Lewis Strauss, nombrado director de la AEC en 1953, creía que la realización de la fusión probaría la superioridad del capitalismo. Sin embargo, desde los comienzos se percibieron dificultades serias, por ejemplo en que las propiedades de los plasmas no eran bien comprendidas, y además que esta comprensión era dificultada por las impurezas que se evaporaban desde las paredes de los reactores.

En el caso de Estados Unidos, sobre el que tenemos mayor información, tanto el personal asignado al proyecto como los presupuestos fueron aumentando rápidamente. Hacia 1953 eran treinta personas, 110 en 1955, el doble al año siguiente. Ese año el presupuesto pasaba de diez millones, en 1958 fue de 29. El primer modelo de reactor fue propuesto por el ya mencionado Spitzer. Se llamó *Stellarator*, y era una máquina en forma de “pretzel”. El modelo B del Stellarator, propuesto en 1953, tendría campos magnéticos muy intensos, del orden de 50 mil gauss, treinta veces más que el anterior, y se esperaba que alcanzara una temperatura de un millón de grados. Comenzó a operar en 1954, de una manera insatisfactoria. El modelo C se planeó como un modelo a escala piloto de un reactor de tamaño comercial, y costaría diez millones de dólares, aunque posteriormente las autoridades del programa decidieron que sólo tendría fines de investigación. En 1953 se completó un estudio sobre un modelo D, que tendría un tamaño de 150 metros, y produciría 5 mil MW, suponemos que térmicos, puesto que aún no se había llegado a una etapa en que se pudiera plantear la conversión de la energía térmica en eléctrica. De cualquier manera era una energía seguramente mayor que la puesta en juego por las mayores máquinas convencionales de generación de energía eléctrica que existían en esa época. Los autores de la propuesta suponían que para el momento en que fuera construido ese tamaño ya resultaría aceptable. La teoría era rudimentaria, pero había una superabundancia de fondos.

Se hicieron experimentos con uso de corrientes enormes, de 40 mil amperios y una configuración toroidal, con la que se esperaba crear filamentos de gas ionizado, con resultados desalentadores. Contra las expectativas que suponían que se mantendrían durante milisegundos, sólo duraron microsegundos. Inicialmente, los cálculos se basaban en modelo lineales, pero la práctica mostró que no eran aplicables, y las computadoras existentes en ese momento eran insuficientes para analizar los no lineales; además, los mode-

los eran los así llamados de partícula única, es decir, no se tomaban en cuenta efectos colectivos. Fueron cuestionados, pero la teoría de los efectos colectivos, es decir oscilaciones del gas ionizado, aún se encontraba en una etapa rudimentaria.

Hacia fines de la década de 1950 se había percibido la aparición de los ya mencionados fenómenos de turbulencia y de una difusión del plasma hacia las paredes mayor que la prevista, así como el efecto nocivo de las impurezas arrancadas de éstas. Hacia 1960 se habían logrado plasmas estables durante decenas de milisegundos. En 1961 se hizo la propuesta de utilizar imanes superconductores para lograr campos magnéticos más intensos. Se propuso que podrían estar en operación para 1966, con lo cual se podría proceder a la construcción de un prototipo.

En la medida en que avanzaba la investigación se detectaron varios tipos de inestabilidades, resultado de efectos colectivos, que causaban pérdidas de energía y limitaban la densidad del plasma. Se produjeron varios adelantos, por ejemplo, la empresa Bell pudo fabricar imanes superconductores que alcanzaron a producir campos magnéticos de 88 kilogauss. Una máquina construida bajo la dirección de James Tuck permitió alcanzar temperaturas de 80 millones de grados y mayores densidades, pero durante tiempos muy cortos, del orden de microsegundos. Se propuso que para reducir las pérdidas y lograr que la máquina operara durante milisegundos había que construir un modelo de mayor tamaño, de unos 500 metros de longitud. Había una incertidumbre completa acerca de las leyes de escala para parámetros tales como campo magnético, diámetro y sección de las máquinas. Sin embargo, hubo mejoras en las técnicas de diagnóstico del plasma, que permitieron determinar, usando láseres, las temperaturas y densidades para diferentes momentos de una descarga y para diferentes puntos a lo largo de una columna de plasma.

Se imaginaron nuevos tipos de reactor, pero el Congreso ya se había vuelto escéptico, recordaba promesas no cumplidas y surgieron propuestas de disminución de los presupuestos. En 1965, la comisión legislativa a cargo de asuntos nucleares (Joint Committee of Atomic Energy) hizo una revisión del programa. Sugirió que si Estados Unidos no lograba ser el primer país en construir un reactor de fusión ello significaría una derrota desde el punto de vista de su prestigio. En una posición totalmente paradójica, admitió que era imposible estimar los costos, pero postuló que la energía nuclear de fusión haría una contribución a la economía, recomendando por ello aumentar los presupuestos en 15 por ciento anual.

En 1965 General Electric decidió reconsiderar su participación y dos años más tarde comenzó a dar fin a su programa. General Atomics siguió con el

suyo, pero con un financiamiento mayormente gubernamental, en tanto que la empresa MKS colaboraba realizando investigaciones pagadas por el gobierno.

A comienzos de la década de 1970 se dio el auge del movimiento ambientalista. Los científicos del programa de fusión proclamaron que sería una energía limpia, y que sólo se emitiría tritio, que tiene una vida media relativamente corta, de doce años. Es muy cuestionable que la emisión de tritio no fuera a producir daños. Proclamaron que se podrían elegir los materiales adecuados para reducir la contaminación radioactiva inducida en las paredes del reactor, y que los “combustibles avanzados” de una segunda o tercera generación serían aún menos contaminantes. Periódicos como el *New York Times* y el *Washington Post* repitieron en 1971 estas afirmaciones, que hoy aparecen como producto de un irrealismo extremo, puesto que treinta años después aún no se ha podido construir un reactor de primera generación que funcione, y la meta parece más lejana que nunca. Además, afirmaron que la fusión nuclear sería más segura. Hubo compañías eléctricas que lanzaron proyecciones exageradas acerca del crecimiento de la demanda para el año 2000 y que produjeron afirmaciones no menos irrealistas sobre las supuestas ventajas de la fusión sobre la fisión, por ejemplo planteando que ¡tendría eficiencias más altas! Al afirmar lo anterior no estoy negando la posibilidad abstracta de que eventualmente un reactor de fusión podría llegar a operar y mostrar eficiencias más altas que uno de fisión. Lo que afirmo es que, para el grado de avance registrado hasta ese momento, una proposición de este tipo era extremadamente conjetural.

Un ejemplo del irrealismo que prevalecía en esa época se encuentra en un artículo de Gerald L. Kulcinski, que preveía que para el año 2010 la energía nuclear de fusión proveería el 10% de la energía eléctrica de Estados Unidos. Incluso discutió los costos, incluyendo los de los materiales empleados, en circunstancias en que no se había aún percibido el efecto probable del daño por radiación sobre los materiales, afirmando que los de la energía generada no serían mayores que los de la producida por la fisión nuclear (Kulcinski, 1975).

En esa época se crearon varios grupos de estudio de esta supuesta alternativa en la Universidad de Princeton y en el laboratorio de Los Alamos, mientras se expandían los programas de posgrado en ingeniería nuclear de fusión, y se creaba una sección de ingenieros en fusión dentro de la asociación profesional de los ingenieros electricistas (Institute of Electrical and Electronic Engineers) que llegó a contar con cerca de 500 miembros en 1974. Con toda razón, señala Bromberg, había un aire de irrealidad en las afirmaciones de algunos de los partidarios de la fusión. Algunos científicos de Los Alamos opinaron correctamente que las compañías eléctricas involucradas no sabían de qué estaban hablando.

Desde la década de 1950 hubo un enorme crecimiento de la investigación básica en la física de plasmas, en la que están involucrados numerosos laboratorios estatales y universitarios en varios países, así como varias sociedades científicas, como la American Physical Society y el mencionado Institute of Electrical and Electronic Engineers. Se publican numerosas revistas, como *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Nuclear Fusion* (publicada por el OIEA), *Fusion Science and Technology* (por la *American Nuclear Society*). La investigación en esta área está subsidiada por varios organismos gubernamentales estadounidenses, como la National Science Foundation, el Department of Energy, la NASA y la Office of Naval Research. Hay empresas involucradas en la investigación de aplicaciones tecnológicas de la física de plasmas. El OIEA organiza una conferencia sobre energía de fusión cada dos años, con 600 participantes en las más recientes.

En 1971, y a pesar de las considerables dificultades ya encontradas, el mencionado Robert Hirsch lanzó una campaña para construir máquinas más grandes. Las llamadas Tokamaks (acrónimo en ruso de “cámara magnética toroidal”) concebidas por el equipo soviético de Lev Artsimovich, cuyo costo inicial proyectado fue de un millón de dólares, ya costaban varios millones, y se propusieron máquinas que costarían decenas, con corrientes que pasarían de 50 mil a 160 mil amperios. Suponían que se alcanzarían tiempos de estabilidad de medio segundo, y que para 1980 podría llegar a establecerse la factibilidad científica de la fusión, es decir verificarse el criterio de Lawson ya mencionado, y para 1990 construirse una planta de demostración.

Hacia 1973 el mayor problema parecía ser el de las impurezas arrancadas de las paredes. Los físicos soviéticos B. B. Kadomtsev, ya mencionado, y O. P. Pogutse plantearon que en la medida en que fueran aumentando las temperaturas, en ese momento del orden de algunos millones de grados, hasta los cien millones, no sólo iba a empeorar el problema sino que se producirían mayores pérdidas de calor por conducción. En ese momento, los costos estimados de un experimento con un Tokamak en la escala propuesta por Hirsch alcanzaba los centenares de millones. El gobierno de Nixon aceptó los pedidos de presupuesto de éste. Se publicaron proyecciones según las cuales los presupuestos alcanzarían 700 millones de dólares a mediados de los 1980 (Smith, 1980; Robinson, 1980). Ello no ocurrió, en realidad los presupuestos alcanzaron un nivel máximo; en 1983 fueron de 450 millones y disminuyeron en los últimos años, a un nivel de 275 millones en 1996.

Cabe hacer notar que siguieron aumentando en circunstancias en que obviamente las optimistas expectativas iniciales antes mencionadas ya se habían demostrado exageradas, y los plazos proyectados se alargaban considerablemente. En efecto, en un libro publicado en 1976, George H. Miley

señalaba que se esperaba demostrar la factibilidad científica antes de 1980 y que la factibilidad “ingenieril” lo sería hasta fines de siglo o comienzos del actual, predicción que resultó también exageradamente optimista (Miley, 1976).

En 1977, James Schlesinger, secretario de Energía bajo la presidencia de Carter, encargó un estudio a un grupo de Wisconsin, que reveló nuevos y mayores problemas. El muy intenso flujo de neutrones y los ciclos extremos de calentamiento y enfriamiento harían que las paredes no pudieran durar más de dos años, por lo que habría que proceder a su reemplazo periódico, que sería efectuado por robots de control remoto.

Hacia 1981 ya se había percibido otro problema igualmente serio, esto es el deterioro de las paredes del reactor por efectos del calor generado, aún para tiempos de operación menores a un segundo. Ya se había observado que el flujo de calor normal a la superficie alcanzaba valores suficientes para fundirla, lo que constituiría un grave problema para máquinas proyectadas como las TFTR y JET, y podría también causar grietas debidas a la expansión térmica de la superficie (Bohdansky, 1981).

El tamaño proyectado de reactores Tokamak estaría entre 500 y 2000 MW, lo que parecía demasiado grande para una tecnología no probada. El tiempo proyectado para la construcción de una planta de demostración se alargó hasta el año 2015.

En 1979, David A. Dingee estimó que serían necesarios miles de científicos e ingenieros que deberían trabajar durante un período de veinticinco a cuarenta años y a un costo de cincuenta mil millones de dólares. Planteó también que habría problemas con la provisión de materiales. Ya aludí a la dificultad de obtención de los isótopos del hidrógeno. Harían falta 200 kilogramos de deuterio y 300 toneladas de tritio para producir un gigawatt-año. El tritio se produciría por irradiación de litio en el mismo reactor. Nuestro autor admitía que, de lograrse la operación comercial de reactores de fusión, podrían agotarse las ya mencionadas reservas probadas de litio en Estados Unidos para el año 2050, pero planteaba la posibilidad de reciclar el litio, o de extraerlo del agua de mar (Dingee, 1979). En este último caso el costo energético sería sumamente alto.

La posibilidad de accidentes por el uso del litio, puesto que se trata de un material muy reactivo, fue mencionada recientemente por una comisión asesora del Parlamento Europeo (Fodor, 1996). La separación del tritio obtenido sería complicada, por la radioactividad y porque se trata de un gas que se formaría a partir de un sólido. En relación con este punto cabe mencionar que los ya mayormente abandonados reactores rápidos de cría, los dos que llegaron a funcionar en Francia, empleaban sodio como refrigerante, que es

un material igualmente reactivo, y que en efecto se produjeron incendios debidos a fugas de éste, lo que también ocurrió en un reactor soviético.

En 1970 comenzaron investigaciones sobre fusión con láser, un procedimiento que también tendría aplicación militar como mecanismo detonante de la bomba de hidrógeno, por lo cual fueron secretas. Los presupuestos aumentaron de dos millones a 145 en 1979 (Smit, 1980).

En noviembre de 1980 el presidente James Carter firmó la Ley sobre Ingeniería Magnética de Fusión (Magnetic Fusion Engineering Act) que estableció el objetivo de construir una planta de demostración para el año 2000.

LA ENERGÍA DE FUSIÓN Y LOS FASCISTAS

Otro aspecto muy poco conocido de la historia de la energía de fusión es que la única organización que realizó una campaña organizada para lograr apoyo público para la energía de fusión fue un movimiento fascista de carácter totalmente marginal. Se trata de un aspecto importante porque, en tanto que parlamentarios de varios partidos y en varios países votaron a favor de los proyectos de la energía nuclear de fusión, con el apoyo de organismos técnicos estatales, y de organismos internacionales como la OIEA, desde el punto de vista del apoyo del público no hubo prácticamente ninguno.

La historia de Lyndon La Rouche y de su movimiento es uno de los capítulos más sorprendentes de la historia política de los Estados Unidos. Una pequeña secta fundada por un personaje paranoide, matón y estafador convicto, tan extraño que hubiera resultado poco creíble aun como personaje de ficción, adquirió una considerable influencia en altos niveles del aparato estatal, en los partidos tradicionales, y en grupos tan diversos como algunos sectores de la comunidad científica y del Ku Klux Klan. No sólo eso, La Rouche fue tomado en serio por altos dirigentes latinoamericanos, como los presidentes José López Portillo, en México, y Raúl Alfonsín, en Argentina. López Portillo siguió promoviendo al timador aun en circunstancias en que cumplía una condena por estafa, involucrando en esta deplorable empresa a personajes de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística (Hernández López, 1998).

La Rouche comenzó su actividad política a fines de la década de 1940 como trotskista, y tuvo participación en los movimientos estudiantiles de la década de 1960. Hacia comienzos de la siguiente, seguido por un núcleo de fanáticos, comenzó a manifestar simpatías por el fascismo. Su política se caracterizó por una demagogia estridente que incluyó la difusión de teorías conspirativas y de acusaciones extravagantes y calumniosas contra varias personalidades públicas, incluyendo a opositores a políticos de extrema derecha,

como el senador Jesse Helms; racismo y antisemitismo; promoción del armamentismo y del militarismo; fraudes financieros y acciones violentas contra partidos y organizaciones de izquierda, como el Partido Comunista de Estados Unidos.

El fascismo de La Rouche tuvo una característica que no tuvieron otros movimientos fascistas, es decir el culto por la “alta” tecnología, tanto civil como militar. Apoyó de una manera militante la energía nuclear, utilizando la calumnia y las acusaciones más descabelladas contra los antinucleares. Creó en 1974 una organización para promover la energía nuclear de fusión, la Fundación de Energía de Fusión (FEF), que tuvo una participación activa en la promoción de sistemas militares de alta tecnología, como la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDI por sus siglas en inglés) también llamada Guerra de las Galaxias, con el apoyo de altos funcionarios del gobierno de Reagan. La organización jugó un papel importante en la propaganda a favor de la SDI en varias capitales europeas, como París, Roma y Bonn, atrayendo a altos cuadros militares de esos países.

La FEF alcanzó considerable apoyo entre los científicos gubernamentales del área de energía de fusión. Publicó dos revistas, *Fusion e International Journal of Fusion Energy*. La Rouche también esbozó planes para la colonización del planeta Marte.

En 1978 en la máquina experimental Large Torus, construida en Princeton, se produjo un avance en cuanto al acercamiento a los valores planteados por Lawson. La FEF trató de manipular a algunos científicos y a los medios en una campaña de propaganda destinada a hacer creer que se estaba al borde de demostrar la factibilidad científica. Alcanzó también influencia en el Congreso de Estados Unidos, que se manifestó por ejemplo en que logró llevar a cabo un evento en el Senado.

A comienzos de la década de 1980 los partidarios mexicanos de La Rouche, que incluían a la después diputada y embajadora en Brasil Cecilia Soto, habían logrado influir sobre funcionarios del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Instituto Mexicano del Petróleo.

En 1984 varios directivos de la FEF fueron enjuiciados por fraude en los estados de Massachussets, Nueva York y Virginia. Los fondos de la FEF fueron intervenidos por el gobierno federal y la organización fue disuelta. Aun después de su desaparición, seguía contando con apoyo de algunos científicos e ingenieros, que en 1987 publicaron un desplegado contra su clausura en la revista *Spectrum* del Institute of Electrical and Electronic Engineers (King, 1989).

DELIRIOS Y PROGRESOS MODESTOS

En la década de 1970 hubo adelantos importantes en la eliminación de macro-inestabilidades y la reducción de micro-inestabilidades, mejoras en la obtención de vacíos, eliminación de impurezas y medición de temperaturas. Sin embargo, no se habían identificado materiales adecuados para las paredes. Se esperaba mejorar la comprensión de las leyes de escala para el confinamiento.

Ya para 1986 apareció un autor que planteó que las leyes de escala que se conocían eran fenomenológicas, es decir no basadas en la comprensión de los fenómenos físicos involucrados, y que por lo tanto su extrapolación hacia mayores tamaños era poco confiable, lo que ponía en una situación difícil a los diseñadores, dado el alto costo de los experimentos con Tokamaks (Roth, 1986). Planteó asimismo que la teoría existente era incapaz de predecir los coeficientes de transporte o los tiempos de confinamiento necesarios para la operación del reactor de fusión, o para extrapolarlos de los experimentos actuales a máquinas mucho mayores

Hacia 1974 se percibía ya que, en caso de que efectivamente pudiera lograrse la fusión, sólo sería posible la operación económica de generadores mucho mayores que cualquiera de los convencionales existentes en ese momento. Tendrían que ser de varios gigawatts, en tanto que los mayores convencionales eran, y siguen siendo del orden de 1 gigawatt. Se esperaba que el crecimiento de la demanda hiciera posible acomodarlos en las redes eléctricas para el año 2000 (Besancon, 1974).

En 1977, N. Bassov, Premio Nobel de Física y uno de los líderes del programa soviético, planteó que la condición de Lawson sería alcanzada “en los ochenta” (Bassov, 1977). Planteó además que una planta de demostración costaría cuatro mil millones, una comercial de 15 a 20. El ya mencionado Boris Kadomtsev había planteado en 1976 que sería posible tener una planta de fusión en funcionamiento para el año 2000 (no está claro si se refería a una de demostración o a una comercial) (Anónimo I, 1976). En 1984 el conocido divulgador de la ciencia Isaac Asimov produjo una evaluación tan frívola como ambigua sobre las posibilidades de la fusión, afirmando que “no cabe duda de que se conseguirán las temperaturas requeridas”, y que “el progreso ha sido lento, pero no existen aún señales definitivas de haber llegado a un callejón sin salida” (Asimov, 1993).

ALGUNOS ACONTECIMIENTOS RECIENTES

Aunque mi información sobre los presupuestos es muy fragmentaria, los escasos datos muestran que seguían siendo considerables. En el caso de Gran

Bretaña era de 132 millones de dólares anuales hacia comienzos de la década de 1990. Sus dirigentes no habían perdido la costumbre de convocar a la prensa y destapar botellas de champaña para celebrar modestos avances, anunciando que los reactores de fusión estarían en operación para el año 2040... o más tarde (Anónimo II, 1991). En el caso de Estados Unidos el presupuesto en los primeros años del siglo era del orden de 250 millones.

No pueden haber dudas de que han habido avances. En efecto, el parámetro más importante es el mencionado producto de Lawson, y en los últimos veinticinco años se logró aumentar cien mil veces. Pero con la característica de que también se han vuelto aparentes las inmensas dificultades del problema. En 1993 y 1994 se hicieron los primeros experimentos extensivos en el Tokamak de Princeton con mezclas de deuterio-tritio, con resultados mejores que en los plasmas de deuterio ensayados anteriormente, alcanzándose valores de potencia cien millones de veces mayores que en los realizados veinte años antes (Anónimo III, 1997). Se trata de un progreso, pero no prueba que el funcionamiento de un reactor viable esté mucho más cerca.

El primer caso de un científico que plantea la posibilidad de que nunca llegue a funcionar un reactor nuclear de fusión fue el de William H. Perkins, en un artículo publicado en la revista *Science*.

Otro caso notable fue el de Lawrence Lidsky, que participó en el programa estadounidense desde 1959, como director asociado del Laboratorio de Plasmas del Instituto Tecnológico de Massachusetts y director de la revista *Journal of Fusion Energy*. En 1972 planteaba que en cinco años se podría establecer la viabilidad de la fusión, aunque reconocía la seriedad de las dificultades existentes, así como la posibilidad de que el logro de la viabilidad científica no garantizaría la técnico-económica, debido a serios problemas ingenieriles, como el del daño por radiación, en lo que el avance posterior del conocimiento mostró que apuntaba en la dirección correcta. A pesar de ello se aferraba a esperanzas metafísicas (Lidsky, 1975).

Sin embargo, hacia 1978 Lidsky se convenció que los problemas tecnológicos no podrían ser resueltos. Planteó que un reactor alimentado con deuterio y tritio sería demasiado grande, complejo, costoso y poco confiable. Mencionó los problemas que causarían las extremas diferencias de temperaturas, ya que los imanes superconductores debían operar a temperaturas cercanas al cero absoluto mientras los plasmas debían estar a decenas de millones de grados. La radioactividad sería tan alta que no permitiría que entraran trabajadores para efectuar reparaciones. Trató discretamente de alertar a sus colegas y a funcionarios gubernamentales, sin lograr que se iniciara una discusión. A algunos no les importaba, otros no querían saber (Haney, 1983).

En la actualidad parecen haberse agotado las posibilidades de todas las máquinas existentes, y por ello se plantea construir una máquina de investigación mucho mayor que las existentes, el llamado International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Cabe mencionar que este proyecto representa un intento de revertir la tendencia que se dio en las dos últimas décadas. En efecto, en 1983 comenzó a operar el reactor mencionado reactor JET, de un diámetro de un metro; entre 1991 y 1999 comenzaron a operar seis reactores experimentales más en Gran Bretaña, Suiza, Alemania, Estados Unidos y Japón, cuyos diámetros eran menores, entre 0,67 y 0,22 metros. Se preveía que el ITER tendría un radio de 6 metros.

El proyecto surgió en 1985 en una reunión del presidente estadounidense Reagan con el primer ministro de la Unión Soviética Gorbachov. Sería realizado como empresa conjunta de varios países, que incluirían a Canadá, varios europeos, Japón, Estados Unidos y Rusia. El costo propuesto por el OIEA sería de unos 3.200 millones de dólares, para la construcción, que duraría nueve años; el de la operación durante veinte años sería de 3.760 millones y el desmantelamiento costaría 335 millones. Fuentes periódicas han publicado cifras más altas, entre diez a quince mil millones de dólares. Su potencia sería de 500 MW, pero requeriría de 110 MW para ser operado, y sólo entregaría 40 MW a la red.

El costo sería diez veces más grande que el del acelerador de partículas del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), probablemente el dispositivo más costoso construido hasta ahora como esfuerzo cooperativo de investigación de varios países. Estas estimaciones muestran que el ya mencionado Bassov obviamente se quedó muy corto, porque en este momento se plantea que la proyectada ITER, que no es ni de demostración ni comercial sino de investigación, podría costar la cantidad que sugirió veinticinco años antes para un reactor comercial.

Si llegara a operar requeriría además enormes inversiones para la provisión de la materia prima. La ya mencionada obtención de tritio por irradiación de litio sólo sería posible una vez que hubiera por lo menos un reactor de demostración. ITER quemaría medio kilogramo de tritio por día, lo que contrasta con las ya mencionadas existencias mundiales.

Una comisión asesora del presidente de Estados Unidos planteó en 1995 que si bien hay varios problemas por resolver los obstáculos no serían insuperables (Schmidt, 1997). Varios físicos han publicado llamados a no construirlo en la revista *Physics Today* (Paméla, 1997; Postel-Vinay, 1997). Los físicos William Dorland y Michael Kotschenreuther presentaron un trabajo en 1996, en el que sugerían que en el ITER habría grandes pérdidas por turbulencia, y que por consiguiente no podría funcionar, en tanto que otros físi-

cos afirmaron que ningún reactor de fusión lo hará nunca (Rothstein, 1997). En 1999 el gobierno de Estados Unidos renunció a participar. Los restantes gobiernos hicieron saber a los autores del proyecto que no podrían pagar el costo y sugirieron que presentaran un proyecto de menor costo. En efecto, se ha estado elaborando un proyecto de reactor que costaría la mitad. Se prevé que su utilidad en lo relativo a ensayos tecnológicos sería menor. En el 2005 los países involucrados decidieron que se construiría en Francia.

LOS RESULTADOS MÁS IMPORTANTES

La investigación sobre energía nuclear de fusión comenzó hace casi medio siglo, en medio de expectativas de un optimismo que ahora puede parecer temerario, si tenemos en cuenta que se trataba de alcanzar condiciones físicas totalmente fuera de escala con las alcanzadas hasta ese momento, y en circunstancias en que la comprensión teórica era muy escasa. Ni los resultados teóricos ni los experimentales resultan suficientes para afirmar que los obstáculos fundamentales han sido superados, ni siquiera que se ha avanzado lo suficiente como para garantizar que las soluciones serán alcanzadas.

La característica central de la historia de la energía nuclear de fusión ha sido el alargamiento de los plazos, el aumento de los costos y la acumulación de problemas no anticipados. Los avances realizados han mostrado varios enormes problemas de este tipo.

En primer lugar, no importa la calidad del conocimiento sobre las leyes de escala para los tamaños alcanzados en los reactores experimentales construidos hasta ahora, nada garantiza su validez para tamaños mayores, mayores temperaturas, y más altas densidades del plasma. El primer gran problema no anticipado, y seguramente el más importante para la historia de la tecnología, es el de las peculiares propiedades de escala de la energía nuclear de fusión. En efecto, como lo afirma el mencionado J. Reece Roth (1986):

las máquinas de vapor, molinos de viento, hasta los reactores nucleares de fisión, se desarrollaron inicialmente para tamaños unitarios pequeños, del orden de decenas de kilowatios a un megavatio [...] [en tanto que] los reactores nucleares de fusión parecen estar gobernados por leyes de escala que determinan tamaños mínimos muy grandes, del orden de los gigawatios.

Por ello parece dudoso que, aun suponiendo condiciones favorables en cuanto a apoyo, pudiera efectivamente demostrarse la factibilidad científica y técnica de esta forma de producción de energía, menos la técnico-económica.

En segundo lugar, está la percepción de la severidad de las condiciones a que serán sometidos los materiales empleados en las máquinas de fusión, es

decir la ya mencionada necesidad de remover las paredes de los reactores tras períodos relativamente cortos de operación, lo que implica la generación de enormes masas de desechos radioactivos, e incluso la posibilidad de que no pueda funcionar nunca porque el gran flujo de calor causaría el deterioro de las superficies interiores de las paredes de los reactores en tiempos muy cortos.

Y finalmente, existe un gran problema teórico no resuelto, sin que existan elementos que permitan vislumbrar una solución. En efecto, en los libros de historia de la ciencia se presenta el gradual desarrollo de cada disciplina. Aparecen entonces como un recuento de problemas resueltos y una lista de los científicos que los fueron resolviendo, pero no se mencionan los no solucionados, ni la posibilidad de que haya problemas insolubles. Tal vez uno de los más importantes dentro de esta categoría es el de la turbulencia, con lo que no quiero afirmar que no se haya avanzado sino que el avance no ha sido suficiente. Este hueco tiene una gran importancia en este caso. Porque en efecto, sabemos que el fenómeno de la fusión nuclear se da en la naturaleza, en el sol y en las estrellas, y en este caso, como ya lo mencioné, los modelos construidos muestran que la región en que se produce el fenómeno está rodeada por una zona de movimiento turbulento del plasma. Pero no sabemos si es posible construir una máquina en que este tipo de movimiento no ocurra, lo que tiene una relación obvia con la insuficiencia de una teoría de la turbulencia. Si es imposible evitar que ocurra, entonces la posibilidad de construir un reactor nuclear de fusión sería muy dudosa, porque el movimiento turbulento sería un obstáculo para limitar el flujo de calor hacia las paredes, lo que provocaría su rápido deterioro. Éste es tal vez el más fundamental de los problemas planteados.

DOS HIPÓTESIS Y REFLEXIONES FINALES

La historia relatada tiene implicaciones para la sociología de la ciencia y para la política y sociología de la tecnología.

La sociología dominante de la ciencia, tal como fue formulada por el estadounidense Robert K. Merton en la década de 1940, supone que la ciencia queda incontaminada por las ideologías o políticas de la clase en el poder (Merton, 1973). La versión de ultraizquierda, a la Varsavsky —por el matemático argentino Oscar Varsavsky, 1920-1976—, supone que ésta le impone sus normas, valores y campos de investigación (Varsavsky, 1994). Contra ambas, es posible una pretensión más modesta, de que en determinadas coyunturas históricas y ámbitos del conocimiento las burocracias técnicas actúan para convertir a determinados grupos de científicos en militantes de una determinada visión, socialmente construida y esencialmente falsa, o falsa o incorrecta en aspectos sustanciales, de determinados sistemas sociotécnicos.

Es indudable que durante los casi cincuenta años transcurridos ha habido una enorme acumulación de conocimientos científicos acerca de la física de plasmas, así como avances tecnológicos importantes, pero ninguna acumulación de conocimientos asegura *per se* las condiciones materiales necesarias para su aplicación efectiva, en este caso en términos del objetivo central.

La situación de la energía nuclear de fisión parece mostrar, después de un período de funcionamiento del mismo orden que el de la investigación en energía nuclear de fusión, que se encamina hacia el fracaso. Fracaso de un sistema tecnológico que ha operado durante medio siglo, y que provee una parte sustancial de la energía de países que son grandes consumidores de energía eléctrica. Esta afirmación puede parecer desmedida, pero sostengo que es correcta, en términos de los objetivos inicialmente planteados por todos los gobiernos a través del OIEA, de que se volviera la forma dominante de generación, ya que sólo llegó a alcanzar un efímero auge durante dos o tres décadas y parece estar en vías de desaparición. Sin embargo, si bien este fracaso de la fisión sería mucho más costoso que el de la fusión, en términos de costos y beneficios parece obvio que el de mayor magnitud es el de esta última; porque en el primer caso los reactores de fisión han funcionado, como se mencionó, mientras que en el segundo ni siquiera se ha llegado a probar su factibilidad desde el punto de vista puramente científico. Con relación a lo anterior, la afirmación que se encuentra en la página web del OIEA en el sentido de que “la investigación en fusión ha sido relativamente barata” parece sumamente extraña.

Es probable que uno de los efectos más importantes de la historia de la investigación acerca de la energía nuclear de fusión haya sido el de mostrar los límites de la ideología del progreso y de la dominación de la naturaleza, que ha permeado al pensamiento occidental desde el siglo XVII, en que fue propuesta por Descartes y Bacon. El científico C. F. von Weizsäcker ha afirmado que “el pensamiento de nuestra ciencia se prueba a sí mismo en la acción, en el experimento exitoso. Experimentar significa ejercer poder sobre la naturaleza. La posesión de este poder es entonces la prueba última de la corrección del pensamiento científico” (citado por Leiss, 1972). Si es así, nuestra incapacidad para demostrar la factibilidad de un reactor nuclear de fusión es una prueba de las insuficiencias de nuestro conocimiento en este terreno.

Uno de los aspectos más notables de esta historia es el reconocimiento por el mencionado David A. Dingee, autor favorable a esta supuesta alternativa, en el artículo mencionado, de que la energía nuclear de fusión nunca tuvo una “*constituency*”, es decir que no tenía apoyo ni de la industria eléctrica ni del público. Nunca hubo una fuerza social visible o grupo de interés o de presión que la apoyara, y se puede suponer que el grupúsculo fascista mencionado

nunca fue un factor de peso. Es por ello totalmente asombroso que a pesar de ello los programas de fusión hayan continuado durante casi cincuenta años, con una enorme inversión de recursos materiales y humanos, sin que se vislumbre o aparezca como cada vez más incierta la posibilidad de una aplicación tecnológica efectiva en términos de su objetivo central. Si es así, la energía nuclear de fusión quedará como el mayor error de predicción tecnológica, y como el mayor derroche de recursos de la historia de la tecnología.

El resultado de que para poder probar la viabilidad de un generador de energía tenga que construirse un modelo, que no es ni siquiera un prototipo, de un tamaño mayor que el de cualquier generador existente, es seguramente uno de los menos imaginados en la historia de la tecnología. Se podría especular sobre la posibilidad de que se llegue al punto en que se pudiera construir un reactor de fusión viable en términos de producción de energía, pero que resultara inviable por su excesivo tamaño.

La viabilidad de una tecnología determinada requiere primero determinar su viabilidad científica, segundo la tecnológica, y finalmente la económica. Sin embargo, si se trata de una tecnología para la cual los costos de investigación y desarrollo se elevan a decenas de miles de millones de dólares, cabe preguntar si no debería comenzar por la viabilidad técnico-económica. En este aspecto, parecería que antes de continuar la investigación y desarrollo procedería calcular los costos que tendría, para máquinas de este tamaño, no sólo el reemplazo cada dos años de las paredes del reactor, sino el costo de los depósitos de desechos para semejantes masas de materiales.

El reconocimiento del fracaso de un proyecto de desarrollo tecnológico no debe ser visto como una posición oscurantista o anticientífica, sino como un reconocimiento de que en determinadas coyunturas históricas puede haber proyectos inviables, o incluso de que puede haber metas tecnológicas deseables pero inalcanzables.

En todos los casos mencionados de fracasos tecnológicos se puede suponer que hubo errores de cálculo, y que era imposible prever que las expectativas no se cumplirían. Pero el caso de la energía nuclear de fusión parecería el más inexplicable desde el punto de vista de errores de cálculo. Si bien podemos aceptar el punto de vista del mencionado Asimov, de que no está probado que sea imposible, cabe preguntar, ¿cuál es la racionalidad de seguir invirtiendo recursos para lograr una meta que parece tan elusiva como costosa, en circunstancias en que tampoco hay ninguna garantía de que si llega a probarse la factibilidad científica con ello también se logre la técnico-económica?

La historia de la energía nuclear de fusión parece entonces la de un gradual deslizamiento hacia la irracionalidad. Porque en efecto, si suponemos que la racionalidad de los programas de investigación y desarrollo apoyados

por los gobiernos acepta plazos y costos mayores que los de las mayores empresas privadas, es muy difícil imaginar que se hubieran invertido los cuantiosos recursos empleados de haber sabido que no se alcanzarían resultados en menos de cien años, período que va más allá de cualquier horizonte de planeación en la historia. Y la renuencia de la comunidad de los científicos nucleares a reconocer que se trata de un fracaso representaría una confirmación de la tesis de que algunas comunidades científicas pueden en determinadas circunstancias comportarse de manera irracional. Por supuesto que hay que agregar que las comunidades científicas no actúan en un vacío social, sino que son influidas por los aparatos ideológicos y técnicos del Estado, y ningún Estado ha renunciado hasta ahora a la energía nuclear, ni al objetivo de continuación del presente modelo energético y de transporte.

En 1948, Anthony Cliff, un militante trotskista británico que publicó libros y artículos sobre temas políticos, formuló una propuesta sobre el futuro del capitalismo que iba en contra de las teorías catastrofistas que habían dominado el pensamiento marxista durante las décadas de 1920 a 1940. La existencia de este pensamiento catastrofista no era casual, sino que se fundaba en varios hechos, tales como la espantosa masacre de la Primera Guerra Mundial, la revolución bolchevique en Rusia y la devastadora crisis económica de 1929. Obviamente, la Segunda Guerra Mundial era otro hecho que podía apoyar este pensamiento catastrofista, que llevó a muchos a pensar que el capitalismo se enfrentaba a una crisis terminal. En contra de esta visión catastrofista, Cliff planteó que podía haber un período de estabilización, y que la carrera armamentista podría contribuir a ésta, como forma organizada y planeada de derroche de recursos, uno de cuyos efectos sería el de atenuar las variaciones cíclicas de las economías capitalistas (Callinicos, 1990).

Cliff no recibió el reconocimiento que merecía. En efecto, los economistas convencionales nunca aceptaron las visiones catastrofistas, y su propuesta era subversiva, en cuanto minaba las pretensiones de las burguesías y de sus gobiernos de que el armamentismo era necesario para confrontar las amenazas de expansión soviética. Por otra parte, el feroz antagonismo entre trotskistas y stalinistas tampoco favorecía el reconocimiento por estos últimos de que los primeros pudieran aportar nada. Se puede suponer que los estudiosos de la ciencia y la tecnología no leen literatura política, menos de grupos marginales como los trotskistas.

Parecería plausible sugerir una extensión de la propuesta de Cliff al caso de la investigación y el desarrollo de los sistemas tecnológicos de gran tamaño, alta complejidad y condiciones físicas extremas. Si la investigación y el desarrollo en estos sistemas continúa a pesar de la acumulación de señales adversas, ello ocurre porque cumple una función política y económica simi-

lar a la de la carrera armamentista. Y si los recursos empleados no lo son para una utilización más racional, como podría ser la investigación y desarrollo en energías “suaves”, tales como la solar, geotérmica, eólica, etc., ello no ocurre solamente por la aversión del gran capital de la industria energética hacia las alternativas de menor escala, por causas que no voy a explorar en este trabajo, sino porque las inversiones nunca podrían llegar al nivel de derroche de recursos de las alternativas como la fusión.

Se podría alegar que el derroche de recursos que representa la investigación y el desarrollo para la energía nuclear de fusión es pequeño en relación con los gastos de la carrera armamentista. Es posible, pero relativamente pequeño no significa despreciable. La irracionalidad de la investigación y el desarrollo en la energía nuclear de fusión y alternativas semejantes podría ser en efecto una contribución pequeña pero significativa a un derroche de recursos que asegura una estabilidad relativa a un sistema socioeconómico que siempre estuvo caracterizado por su irracionalidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo I (1976), entrevista a Boris Kadomtsev publicada *El Día*, 20 de octubre, p. 21, reproducida de *Novedades de Moscú*, N° 41.
- Anónimo II (1191), información de la agencia Reuters, “Afirman haber logrado el control de la fusión nuclear”, en *La Jornada*, 11 de noviembre, p. 30.
- Anónimo III (1997), *1998 Yearbook of Science and the Future*, Encyclopedia Britannica, Inc., pp. 305-306.
- Asimov, Isaac (1993), *Nueva guía de la ciencia: ciencias físicas*, Barcelona, RBA Editores, pp. 634 y 636; original publicado por Basic Books en 1984.
- Bassov, N. (1977), “International Cooperation in Thermonuclear Physics”, en *Scientific World*, XXI, 4, Londres, pp. 20-21.
- Besancon, Robert M. (comp.) (1974), *Encyclopedia of Physics*, 2ª ed., Van Nostrand, artículo sobre “fusion”, pp. 377-381.
- Bohdansky, J. (1981), “Plasma Wall Interactions in Tokamaks”, en G. Casini, (comp.), *Plasma Physics for Termonuclear Fusion Reactors*, Harwood, pp. 219-253.
- Bromberg, Lisa Joan (1982), *Fusion: Science, Politics and the Invention of a New Energy Source*, MIT Press.
- Callinicos, Alex (1990), *Trotskyism*, University of Minnesota Press.
- Dingee, David A. (1992), “Fusion Power”, en *Chemical and Engineering News*, 2 de abril de 1979, pp. 32-47.

- Flores Valdés, Jorge y Menchaca, Arturo, *La gran ilusión: la fusión fría*, México Fondo de Cultura Económica.
- Fodor, Igor (1996), "Views ITERated on Proposed New Reactor, Ignitor, Fusion Power", carta al director de *Physics Today*, diciembre, pp. 11-13; el autor cita a *The Economist* del 16 de noviembre de 1995, p. 10.
- Haney, Daniel Q. (1983), "Thermonuclear fusion isn't the answer, says energy authority", en *Boston Globe*, 3 de octubre, p. 45.
- Harich, Wolfgang (1975), *Kommunismus ohne Wachstum*, Rowohlt Verlag, Reinbek.
- Hernández López, Julio (1998), "Astillero", en *La Jornada*, 7 de diciembre, p. 10.
- Jones, Barrie W. (1999), *Discovering the Solar System*, Nueva York, John Wiley.
- King, Dennis (1989), *Lyndon La Rouche and the New American Fascism*, Doubleday.
- Kulcinski, Gerald L. (1974), "Fusion Power: An Assessment of its Potential Impact in the United States", en Lon C. Ruedisili y W. Firebaugh Morris (comps.) (1975), *Perspectives on Energy*, Oxford University Press, pp. 312-335; originalmente publicado en *Energy Policy Journal*, junio de 1974.
- Leiss, William (1972), *The Domination of Nature*, Boston, Beacon Press.
- Lidsky, Lawrence (1974), "The Quest for Fusion Power", en la misma compilación de Lon C. Ruedisili y W. Firebaugh Morris, pp. 299-311, originalmente publicado en enero de 1972 en *Technology Review*.
- Lowen, Rebecca S. (1987), "Entering the Atomic Race: Science, Industry and the Government", en *Political Science Quarterly*, 102, 3, otoño, pp. 459-479.
- Mariscotti, Mario (1985), *El secreto atómico de la Isla Huemul*, Buenos Aires, Editorial Sudamericana.
- Martin, Brian y Richards, Evelleen (1995), "Scientific Knowledge, Controversy and Public Decision Making", en Sheila Jasanof *et al.*, *Handbook of Science and Technology Studies*, Sage.
- Martinell, Julio (1995), *Los prometeos modernos o el esfuerzo para controlar la fusión nuclear*, 2ª ed., Fondo de Cultura Económica.
- Meadows, D. L. *et al.* (1972), *Límites del crecimiento*, México, Fondo de Cultura Económica; edición original en inglés publicada el mismo año.
- Merton, Robert K. (1973), *The Sociology of Science*, University of Chicago Press.
- Miley, George H. (1976), *Fusion Energy Conversión*, American Nuclear Society, p. 1.
- Miyamoto, Kenro (1980), *Plasma Physics for Nuclear Fusion*, MIT Press, pp. 523-524.
- Paméla, Jérôme y Michel Chatelier (1997), "Des Premiers Tokamaks au Projet ITER: la longue marche de la fusion para confinement magnétique", en *La Recherche*, N° 299, junio, pp. 61-66.

- Kenneth, J. H. Phillips (1992), *Guide to the Sun*, Cambridge University Press.
- Postel-Vinay, Olivier (1997), "ITER Sera-t-il Jamais Construit? Autour de ce mégaprojet l'étau des critiques se resserre", en *La Recherche*, N° 299, pp. 72-75.
- Robinson, Arthur L. (1980), "Energy Sweepstakes: Fusion Gets a Chance", en *Science*, 210, 24 de octubre, p. 415.
- Roth, J. Reece (1986), *Introduction to Fusion Energy*, Ibis, pp. 360-361.
- Rothstein, Linda (1997), "Turbulent Times for Fusion Power", en *Bulletin of Atomic Scientists*, septiembre-octubre, pp. 5-8; cita varias cartas publicadas por James Krumhansl, William Perkins y Chauncey Starr en *Physics Today* de marzo de 1997.
- Schmidt, John A., Davidson, Ronald C. y Holt, Rush D. (1997), "Development of Fusion Power Seen as Essential to World's Energy Future: Critics Respond", carta al director de *Physics Today*, mayo, pp. 11 y 13.
- Smit, Win A. y Boskma, Peter (1987), "Laser Fusion", en *Bulletin of Atomic Scientists*, diciembre, pp. 34-38.
- Smith, Jeffrey R. (1980), "Legislators Accept Fast Paced Fusion Program", en *Science*, 210, 17 de octubre, p. 290.
- Stewart, John A. (1990), *Drifting Continents and Colliding Paradigms: Perspectives on the Geoscience Revolution*, Indiana University Press.
- Varsavsky, Oscar (1994), *Ciencia, política y cientificismo*, Buenos Aires, Centro Editor de América Latina [primera edición, 1969].