

## La antorcha de fusión puede crear nuevas materias primas

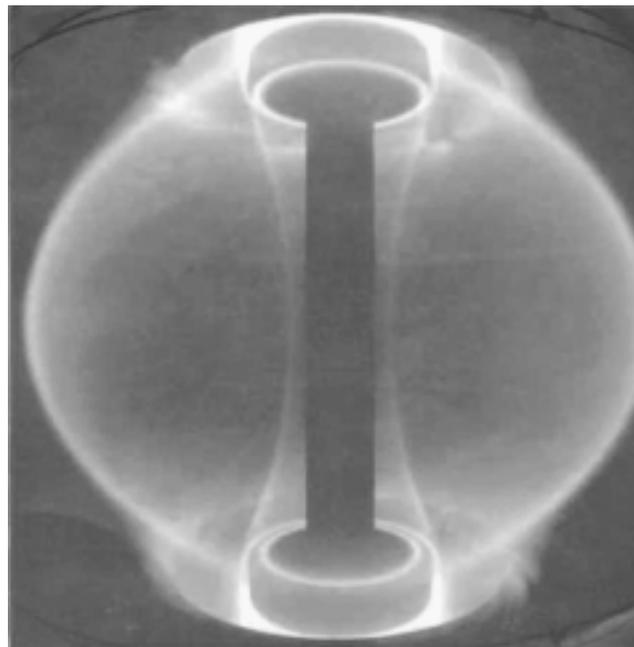
*La antorcha de fusión puede crear nuevos recursos minerales de la tierra o las rocas, y deshacerse de los desechos al reducirlos a los elementos que los componen, nos dice Marjorie Mazel Hecht en su siguiente informe.*

No debe ser motivo de pánico, racionamiento o demandas de control poblacional el que pronto podrían agotarse los recursos y las materias primas que necesita el mundo. Tenemos la capacidad en este momento de crear los recursos que necesitamos usando tecnología avanzada. Los reactores nucleares convencionales pueden proveer la energía para desalar el agua de mar, y los de alta temperatura pueden crear hidrógeno para reemplazar el combustible de petróleo. Las aun más elevadas temperaturas disponibles de la fusión termonuclear pueden generar los plasmas capaces de reducir la basura y desechos a sus elementos básicos, lo que eliminaría el problema de botarlos. Estos plasmas de alta temperatura también podrían extraer minerales estratégicos de cualquier piedra.

La nueva clase de antorcha de fusión podría cambiar de modo drástico la relación del hombre con la corteza terrestre. Para tener una idea de lo que esto significa, pensemos que de una milla cúbica de roca ordinaria podría obtenerse casi 200 veces la producción anual de aluminio de Estados Unidos, 8 veces su producción de hierro, 100 la de estaño y 6 la de cinc. Aunque todavía sería necesario encontrar las vetas más ricas para los usos actuales, esta nueva tecnología nos permitiría explotar con mayor eficacia las vetas menos ricas. Además, la antorcha de fusión, combinada con la nueva tecnología de separación de isótopos, asegurará nuestra capacidad de usar a cabalidad todos los 3.000 isótopos conocidos. En verdad no hay límites al crecimiento si permitimos el desarrollo pleno de las ideas científicas y los proyectos que datan de los 1960, cuando la ciencia y la población mundial fueron obligadas a apartarse de la senda del progreso.

### El poder de los plasmas

Los plasmas de fusión son gases calientes ionizados que alcanzan temperaturas de entre 50 y 200 millones de grados, tan calientes que casi cualquier material puede manipularse a su nivel atómico (la ionización significa que al átomo se le ha despojado de sus electrones, y queda con una carga eléctrica). Hace 40 años, cuando la idea de la antorcha de fusión fue patentada, prevalecía el optimismo científico y se presumía



*Descarga de plasma en el tokamak esférico europeo de fusión MAST en Culham, Inglaterra. En un tokamak esférico, el plasma parece más bien una manzana a la que se le quitó el corazón, que una dona. (Foto: Administración de Energía Atómica del Reino Unido).*

que los reactores de fusión serían el siguiente paso natural hacia la fisión nuclear. Muchos proyectos y procesos de fusión se investigaron entonces (tokamaks, estelarators, el toro ondulado o irregular, por nombrar algunos solamente), y había un entusiasmo por lo prometedor del caso, muy similar al que había por explorar el sistema solar.

El desarrollo de la fisión y la fusión fue abortado a principios de los 1970 por la ideología anticientífica (y sus respectivos cortes presupuestales) que se le metió a la población de EU y, en especial, a la generación joven, que la puso en contra del progreso. Precisamente por la promesa que ofrecían la fusión y la fisión, de elevar el nivel de vida de todo el mundo y de liberar al Tercer Mundo de las epidemias y la pobreza, fue que estas tecnologías fueron atacadas y casi enterradas en el mismo EU que las desarrolló.

Ahora que la energía nuclear empieza a renacer en todo el orbe, es tiempo también de emprender un “renacer” de la fusión termonuclear entre la población. Los detractores de miras estrechas de ambas tecnologías y los pragmáticos de pe a pa que están dispuestos a esperar otros 50 años, necesitan una dura y prolongada sacudida. Este país no lo construyó gente que dice: “Es imposible”, “No funciona porque. . .”, “Cuesta demasiado” o “Eso perturbará a la madre naturaleza”. El propósito de este artículo es empezar a sacudir a aquellos que lo necesitan, y a educar a los que quieren saber más.

### La fusión termonuclear

En la fisión, el rompimiento de los elementos más pesados (como el uranio) libera una cantidad tremenda de energía calórica. Como combustible, el uranio es 3 millones de veces más denso en energía que el carbón y 2,2 millones de veces más que el petróleo. Pero la fusión de isótopos de hidrógeno es órdenes de magnitud más densa en energía y más difícil de aprovechar como fuente de energía (ver **tabla 1**).

Cuando dos átomos del elemento más ligero, el hidrógeno, se fusionan, el proceso produce helio (el segundo elemento más ligero) y “libera” energía en la forma de calor. Por cada dos núcleos de hidrógeno como combustible, se produce uno de helio (llamado partícula alfa) y una cantidad específica de energía, que proviene de la diferencia de masas entre el hidrógeno que entra y el helio que sale (ver **figura 1**).

La fusión es el proceso que ocurre en el Sol y las estrellas cuando los elementos de la luz chocan a altas velocidades y altas densidades. El problema es cómo reproducir el proceso aquí en la Tierra. Fusionar átomos en el laboratorio exige temperaturas muy altas, como las del Sol (decenas de millones de grados centígrados), y un medio para contener y controlar la reacción, de modo que se mantenga a un ritmo estable por un período largo de tiempo.

Tanto en el Sol como en el laboratorio, temperaturas ultraelevadas despojan al núcleo de sus electrones de carga negativa, lo que resulta en un gas altamente cargado llamado plasma. El plasma, llamado el cuarto estado de la materia,

TABLA 1

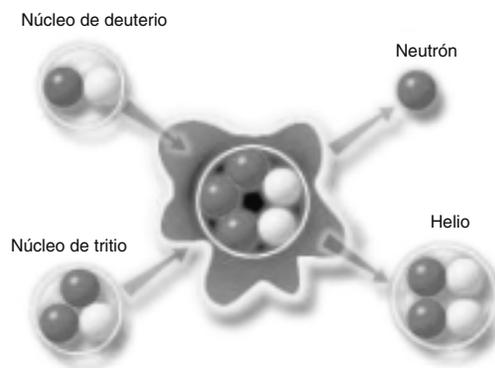
### Densidad energética de diferentes fuentes (megavatios por metro cuadrado)

Solar, de biomasa	0,0000001
Solar, de la superficie terrestre	0,0002
Solar, de la cercana a la órbita de la Tierra	0,001
Fósil	10,0
Fisión	entre 50,0 y 200,0
Fusión	billones

*La naturaleza altamente concentrada de la energía nuclear y de la fósil es sorprendente en comparación con la naturaleza difusa de la energía solar sobre la superficie de la Tierra. Aun cuando se colocaran celdas solares en la órbita cercana de la Tierra, la densidad energética sigue siendo 4 o 5 veces inferior a la de los combustibles fósiles.*

FIGURA 1

### El proceso de fusión



Fuente: “The Surprising Benefits of Creating a Star” (Los sorprendentes beneficios de crear una estrella), Departamento de Energía de EU, 2001.

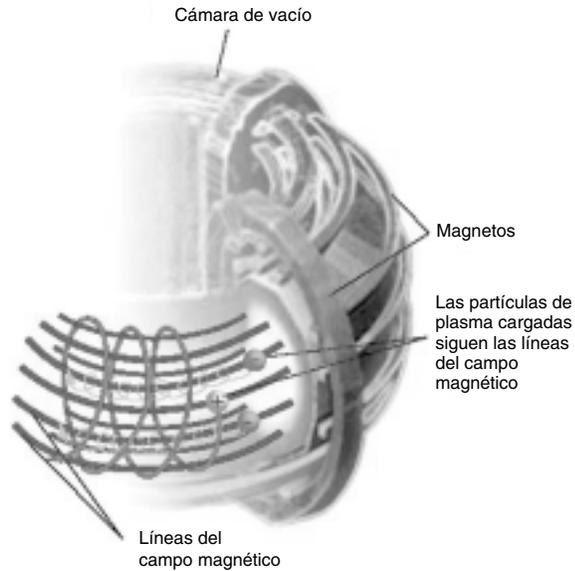
*Una reacción de fusión tiene lugar cuando dos isótopos de hidrógeno, el deuterio y el tritio, se combinan para formar un átomo más grande, liberando energía en el proceso. La fusión es lo que alimenta al Sol y las estrellas, pero, en el laboratorio, los átomos tienen que calentarse al menos cien millones de grados, bajo la presión necesaria, para producir la fusión. Otros elementos de la luz también pueden fusionarse.*

es una palabra más conocida en la actualidad gracias a la tecnología de las pantallas de televisión. Las pantallas de plasma tienen dos capas delgadas de vidrio que atrapan a los gases argón, neón y xenón; se excita a los átomos del gas para que alcancen el estado de plasma mediante pulsos eléctricos, emitiendo color.

Desde los 1950, los científicos han explorado diferentes formas de calentar y confinar núcleos de hidrógeno para fusionar los átomos de sus isótopos más pesados, el deuterio (H-2) y el tritio (H-3). Como su nombre lo indica, el deuterio tiene

FIGURA 2

## Fusión por confinamiento magnético



Fuente: "The Surprising Benefits of Creating a Star" (Los sorprendentes beneficios de crear una estrella), Departamento de Energía de EU, 2001.

Este diagrama de un tokamak muestra los magnetos, las líneas del campo magnético y las partículas de plasma cargadas que siguen esas líneas, en espiral, alrededor del tokamak. Los campos magnéticos "contienen" el plasma.

dos neutrones y el tritio tres, mientras que el hidrógeno ordinario sólo tiene uno. El deuterio se encuentra de forma natural en el agua de mar, pero el tritio es raro, y tiene que crearse mediante la desintegración del litio.

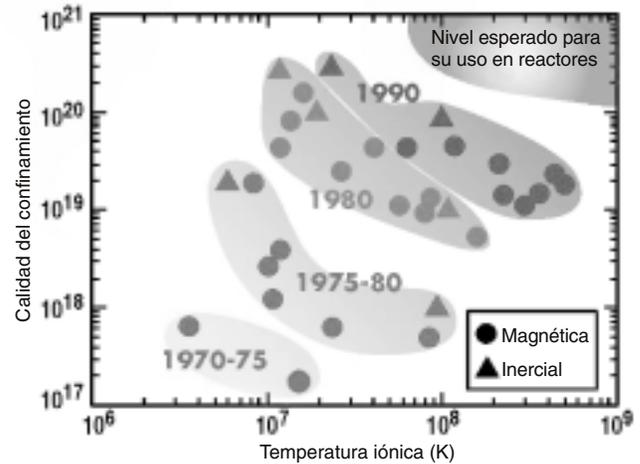
Los dos métodos básicos para controlar la fusión se conocen como confinamiento magnético y confinamiento inercial.

**Confinamiento magnético.** En este método se usan campos magnéticos para "mantener" el plasma de fusión en posición. El reactor magnético más común se llama *tokamak*, del término ruso para cámara toroidal (con forma de dona). El plasma de fusión se contiene con un fuerte campo magnético que crea la combinación de campos magnéticos toroidales y poloidales (los primeros se refieren a la ruta larga alrededor del toro, y los otros a la corta). Los campos magnéticos resultantes obligan a las partículas de fusión a seguir trayectorias en espiral alrededor de las líneas del campo (ver **figura 2**). Esto evita que golpeen las paredes de la vasija del reactor, lo que podría enfriar el plasma e inhibir la reacción.

Tal como en la fisión, donde la velocidad y la densidad de los átomos que se fisian y los isótopos más adecuados tienen que definirse y diseñarse de manera cuidadosa a fin de crear las condiciones óptimas para una reacción en cadena, en

FIGURA 3

## Progreso de la fusión de 1970 a 2000



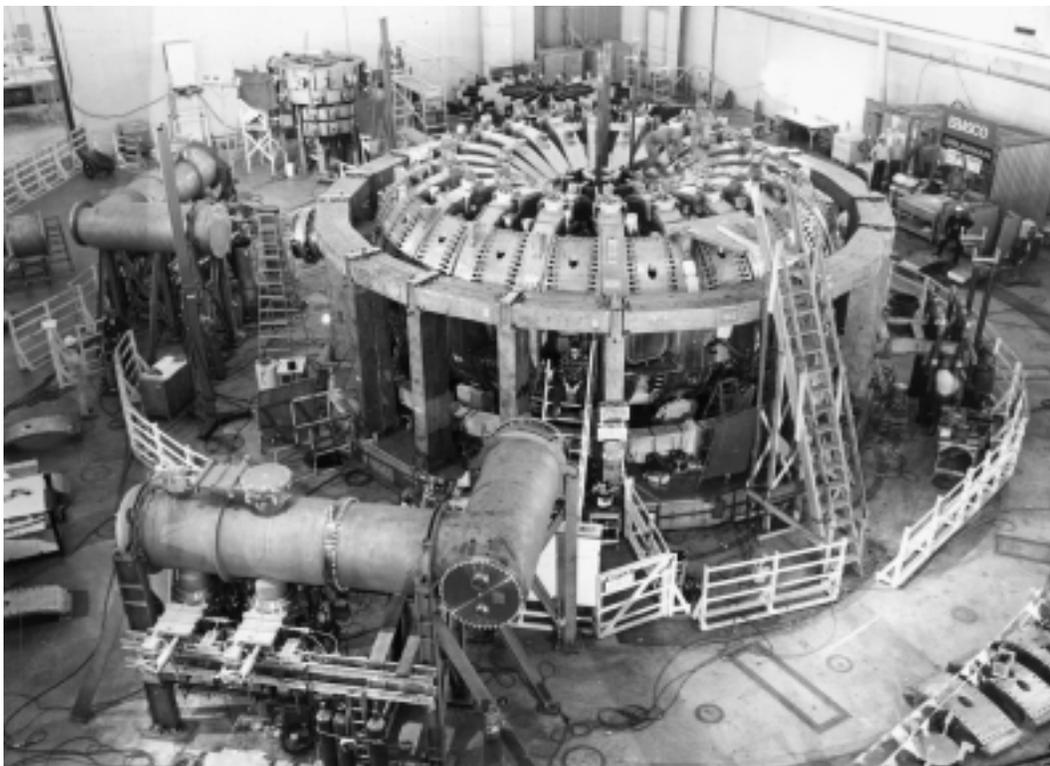
Aunque el programa de fusión se eliminó de la ingeniería y se limitó a la investigación científica, ha habido un progreso continuo, década tras década, en la calidad del confinamiento del plasma en la fusión magnética e inercial (medida en densidad de plasma por tiempo de confinamiento) como función de la temperatura del plasma (en grados Kelvin). Las condiciones para obtener un plasma de la calidad necesaria para un reactor aparecen en la esquina superior derecha.

la fusión los investigadores deben decifrar cuál es la densidad más favorable del hidrógeno y otras condiciones para producir la fusión. Aquí es donde viene lo divertido, diseñar diferentes aparatos para probar hipótesis sobre cómo mantener y controlar un plasma de fusión.

Hay muchos reactores de investigación tokamak alrededor del mundo, entre ellos algunos pequeños en EU, y hubo una sucesión de tokamaks cada vez más grandes en el Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton. Este aumento en la capacidad debió haber continuado, de no ser por los recortes presupuestales que se describen abajo. Cada nuevo reactor alcanzaba temperaturas mayores y tiempos más largos de confinamiento. Cada reactor también hizo progresos en resolver las dificultades técnicas, tales como el calentamiento, la turbulencia o la radiación (ver **figura 3**).

El reactor más grande es el tokamak ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional), de patrocinio internacional, a construirse en Cadarache, Francia para producir energía de fusión en un punto de equilibrio; o sea, con la generación de más energía que la necesaria para generar una fusión estable. Los patrocinadores son la Unión Europea, Japón, la Federación Rusa, Corea, China, India y EU. La meta del ITER es producir 500 MW de energía de fusión por hasta 500 segundos. El predecesor del ITER, el JET (Toro Europeo Conjunto), sólo produjo 16 MW por menos de un segundo.

El ITER generará energía neta en la forma de calor, pero ese calor no se usará para generar electricidad. Ned R. Saut-



*En una entrevista reciente, Ben Eastlund dijo que había propuesto pequeños tokamaks como proveedores de plasma para su antorcha de fusión. Tokamak TFTR en el Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton en diciembre de 1982. Los siguientes tokamaks que tenía programados el programa de Princeton nunca se construyeron.*

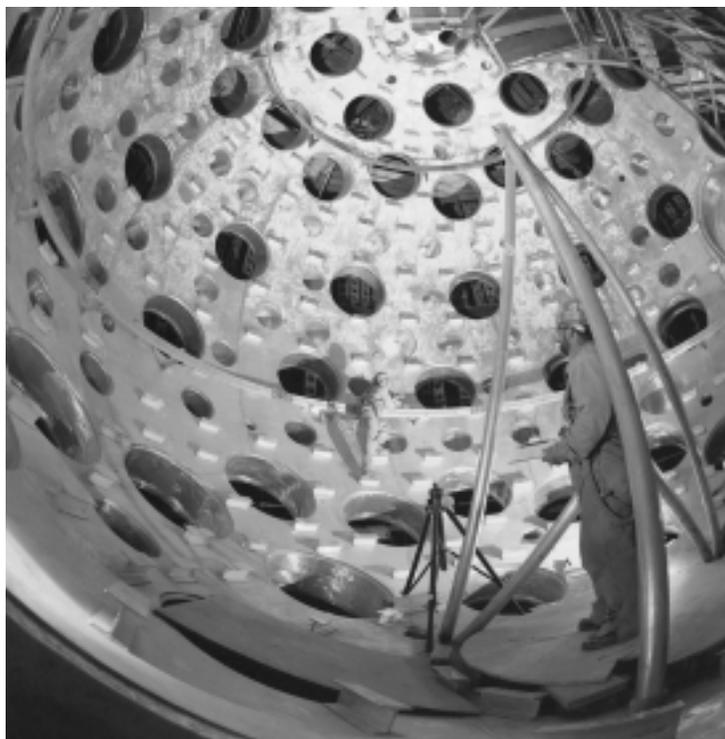
(Foto: Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton).

hoff, el jefe de proyecto de la delegación estadounidense en el ITER, calcula que entrará en funcionamiento para el 2016 y que habrá plantas comerciales para el 2050. Un prototipo comercial generaría entre 3.000 y 4.000 MW de energía térmica.

**Confinamiento inercial.** En el confinamiento inercial, también conocido como fusión láser, rayos láser o de electrones se enfocan en una pequeña pastilla de combustible de fusión, lo que enciende una minúscula explosión de fusión controlada (ver **figura 4**). En contraste, en la bomba de hidrógeno se usa la fisión para encender el combustible de fusión en una reacción de fusión *descontrolada*. El término “inercial” se refiere al hecho de que los átomos del blanco tienen que usar su propia inercia para no dispersarse antes de poder fusionarse.

La idea básica es calentar rápidamente la superficie del blanco para que la rodee un plasma caliente. Entonces, conforme el material superficial caliente se “dispara” como un cohete, el combustible se comprime. El núcleo del combustible tomado como blanco se vuelve entonces muy denso, y se enciende cuando alcanza los cien millones de grados centígrados. Conforme “arde”, produce muchas veces más energía que la del rayo usado para encenderlo.

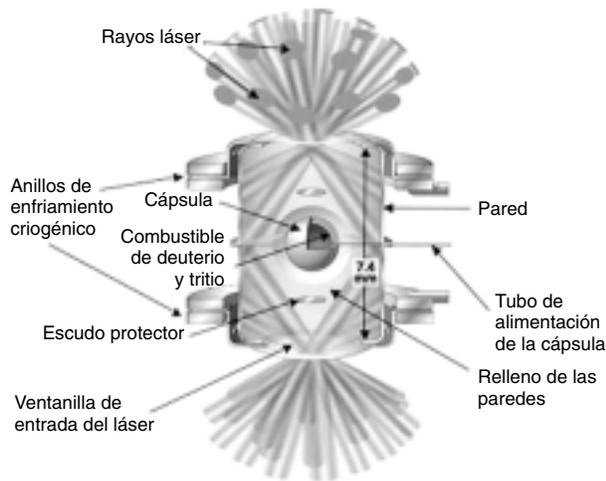
EU tiene grandes instalaciones de fusión láser en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, el NIF o Centro de Ignición Nacional. Otros



*Interior de la cámara de confinamiento del Centro de Ignición Nacional del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. El combustible de fusión es diminuto, pero la cámara mide más de 9 metros de diámetro y pesa casi 500 toneladas.*

FIGURA 4

## Confinamiento inercial



Fuente: Laboratorio Nacional Lawrence Livermore.

*Este diagrama del Centro de Ignición Nacional muestra la serie de rayos láser que se enfocan en la minúscula pastilla de combustible de fusión (de deuterio y tritio), que está encapsulada en berilio y carburo. Los rayos láser comprimen y calientan la pastilla de combustible en una milmillonésima de segundo, de modo que el deuterio y el tritio se fusionan antes de que la pastilla se desintegre. El término “inercial” se refiere al hecho de que los átomos tienen que contar con la inercia suficiente para evitar salir disparados antes de poder combinarse.*

programas de confinamiento inercial láser son el Omega, del Laboratorio de Energéticos Láser de la Universidad de Rochester; el Nike, del Laboratorio de Investigación Naval; y el Trident, del Laboratorio Nacional Los Alamos. También están el Acelerador de Partículas de Fusión por Rayos y el centro de energía por pulsos Saturno de los Laboratorios Nacionales Sandia.

Todos los programas de confinamiento inercial apoyan a la Administración Nacional de Seguridad Nuclear del Departamento de Energía y otros programas de defensa relacionados con armas nucleares, así como objetivos científicos básicos y de uso civil de la energía. El aspecto bélico los hace blanco de grupos antinucleares, los cuales quieren cancelar el programa armamentista y todo aquello que tenga que ver con lo nuclear, incluso la fusión. El NIF también cuenta con la colaboración de la industria y las universidades.

El NIF es el láser más grande del mundo, del tamaño de un estadio de fútbol, y es muy poderoso. El sistema láser equivale a 1.000 veces toda la generación eléctrica de EU. Cada pulso es muy corto, tan sólo de unos cuantos miles de millonésimas de segundo, dirigido hacia un blanco diminuto, de un milímetro. Los experimentos consisten en dirigir este poderoso rayo contra el blanco por sólo una fracción de segundo, y estudiar luego los resultados.

## ¿Qué pasó con la fusión?

Los últimos 25 años de la investigación de fusión en EU son una historia triste; el programa de fusión fue víctima de cortes presupuestales tan severos, que no pudo hacerse ningún progreso de ingeniería, tan sólo investigación en la resolución de problemas. No obstante, en 1980 la investigación de fusión había progresado tan bien, con una amplia variedad de dispositivos de fusión, que ambas cámaras del Congreso aprobaron la ley de Ingeniería de la Energía de Fusión Magnética de 1980, que ordenaba, en el espíritu del programa Apolo, que EU acelerara el programa de fusión magnética, 1) para tener listo un prototipo de ingeniería para 1990, y 2) un reactor de demostración a la vuelta del siglo.

El presidente Carter aprobó la ley 96-386 el 7 de octubre de 1980. El propósito de la ley era: “Disponer un programa acelerado de investigación y desarrollo de las tecnologías de energía de fusión magnética que lleven a la construcción y funcionamiento exitoso de una planta de demostración en EU antes de que termine el siglo 20, a cargo del Departamento de Energía”.

La ley especificaba cómo había de hacerse esto, y el financiamiento necesario: con un aumento del doble del presupuesto de 1980 para la fusión magnética en los siguientes 7 años, que empezaría con uno de 25% al financiamiento en los años fiscales de 1982 y 1983.

La Fundación de Energía de Fusión que estableció Lyndon LaRouche en noviembre de 1974 estuvo en el centro de la pelea por la fusión, y la revista de la fundación, *Fusión*, que tenía un tiraje de casi 200.000 ejemplares, hizo de la “fusión” una palabra de uso corriente en los años que precedieron a la aprobación de la ley. Le brindó al público un entendimiento de la ciencia de fusión y del progreso experimental de muchas clases de aparatos diferentes.

Pero el Gobierno de Reagan nunca asignó los fondos que especificaba la ley de Fusión. Seguía estando en el papel, pero el Departamento de Energía relegó la fusión a un mero programa de “investigación científica”, y no al de ingeniería que especificaba la ley. Al igual que el programa Apolo, la fusión encendió la ira de los que decían que costaría demasiado, sin importar el beneficio que le traería a las futuras generaciones perfeccionar una fuente de energía de alta temperatura cuyo combustible se obtuviera del agua de mar y que no arrojará desechos. Estos críticos —incluso, desde 1989, muchos investigadores de “fusión en frío” cuyo trabajo tampoco recibía financiamiento— se quejaron de que, por años, la investigación de fusión había recibido x cantidad de dinero, sin producir beneficios comerciales, así que ¿para qué tirar más dinero al “caño”?

El problema general es una profunda ignorancia sobre cómo funciona una economía física y, para una economía



*La revista Fusión hizo de la “energía de fusión” un término de uso corriente a fines de los 1970 y principios de los 1980. El representante estadounidense Mike McCormack, un demócrata del estado de Washington, habla en mayo de 1981 en una conferencia de la Fundación de Energía de Fusión en Washington, D.C. La ley de Ingeniería de la Energía de Fusión Magnética de 1980 fue llamada la ley McCormack, en honor de este incansable campeón de la energía nuclear.*

sana, qué porcentaje de fondos públicos deben invertirse en la investigación científica para que sea un “motor” para el resto de la economía. Sin esos motores científicos, la economía entra a un callejón sin salida. Conforme EU se hundía más en los “servicios”, en vez de la producción, y esquilmbaba y “privatizaba” los programas de investigación de sus laboratorios nacionales, universidades y otras instituciones, la nación perdió en gran medida su capacidad de descubrir nuevos principios científicos y de educar a las nuevas generaciones de estudiantes que podían haber sacado al país adelante.

Si no se le da marcha atrás a estas políticas anticientíficas y enemigas de la prosperidad, EU caerá a la condición de una nación del Tercer Mundo, al tener que importar las tecnologías que se perfeccionan en otras partes. EU necesita un programa de emergencia para recuperar lo que ha perdido y asegurar que el mundo se beneficie del impulso de la ley de Ingeniería de la Energía de Fusión Magnética de 1980 en los próximos 25 años.

La estrechez de miras de los cortes presupuestales a la fusión llegó al extremo en 1999, cuando EU decidió no financiar su parte de la colaboración internacional de fusión en el ITER, lo que le dejó el proyecto a Europa, Rusia, Japón y otras naciones (esta decisión se anuló en 2003, y EU participa de nuevo en el ITER). La fusión en la actualidad cuenta con un puñado de reactores de investigación en EU, todos en laboratorios nacionales, universidades y una compañía privada (General Atomics), con un pequeño núcleo de científicos de fusión experimentados y un reducido número

de jóvenes estudiantes.

La creación de un reactor para una economía de fusión es un ejemplo de un gran proyecto pensado para los próximos 50 años, cuando la mayoría de quienes lo iniciaron ya habrán dejado de existir. Pero qué mejor inspiración para las generaciones más jóvenes que trabajar en el perfeccionamiento de una fuente de energía prácticamente ilimitada, en vez de en el poder del estiércol.

### **Retrospectiva histórica de la antorcha de fusión**

La historia de la evolución del hombre en la Tierra puede medirse con más precisión mediante el concepto básico de la economía física que elaboró Lyndon LaRouche: el ritmo de cambio de la densidad relativa potencial de población. Cómo la sociedad humana puede mantener a un número creciente de personas por kilómetro cuadrado de territorio habitado. La clave aquí es el dominio de tecnologías cada vez más complejas, que le permitan a una población prosperar más allá de los límites de las condiciones naturales del clima y la geografía. Para esto, los individuos tienen que *crear* cada vez más recursos nuevos, en particular recursos energéticos y tecnologías cada vez más densas en energía, para que la sociedad entera prospere. Es así como se superan los límites previos al crecimiento de la sociedad.

El incremento en la densidad de flujo energético de las tecnologías disponibles está directamente relacionado con el crecimiento demográfico. En algún momento de la historia humana no existían los minerales, porque no había la energía

disponible para convertirlos en otra cosa que la tierra y las piedras en las que los encontramos (excepto por el uso de herramientas rudimentarias para darle forma a otros objetos rudimentarios, pero útiles). La introducción del fuego y la diversificación de sus usos cambió la situación, al proporcionar un aumento múltiple en la densidad energética para la fundición, y convertir el cinc y el cobre en bronce, por ejemplo. Miles de años después, otra “roca”, el uranio, se convirtió en un recurso energético poderoso.

Con cada avance en la tecnología energética —la madera, el carbón, el petróleo, el gas, el uranio—, hubo un aumento impresionante de la población humana, conforme el hombre hacía uso de tecnologías cada vez más densas en energía (ver **figura 1**). Ciertamente convertíamos la tierra, las piedras y otras sustancias en recursos energéticos. Ahora tenemos ante nosotros la fusión, que se crea a partir de un combustible de agua de mar, un billón de veces más denso en energía que sus predecesores; y después de eso, ¿quién sabe? ¿Interacciones de materia y antimateria? O quizás otra cosa que mandará a más “leyes de la física” a un bien merecido retiro.

Entonces, la antorcha de fusión no es ninguna sorpresa cuando la consideramos como un eslabón en esta cadena de avances.

En mayo de 1969 dos investigadores de la Comisión de Energía Atómica de EU, Bernard J. Eastlund y William C. Gough, publicaron el folleto *The Fusion Torch: Closing the Cycle from Use to Reuse* (La antorcha de fusión: Se cierra el ciclo, del uso al reuso), que describía dos usos para los plasmas de temperatura ultraelevada que esperaban lograrse con los reactores de fusión comerciales. El primero era una antorcha de fusión que usaría el plasma de alta temperatura “para reducir *cualquier* material a sus elementos básicos por separación”. El segundo era “el uso de la antorcha de fusión para transformar la energía del plasma de temperatura ultraelevada en un campo de radiación, que permita que se genere calor de proceso *en el cuerpo* de un fluido”. Por ejemplo, se añadirían elementos pesados al plasma, de manera que emita rayos X u otra radiación en grandes cantidades para efectuar trabajo sin las limitantes de una superficie que absorba parte de la energía.

Su idea, concebida en 1968, cautivó la imaginación de muchos, incluso la de la prensa estadounidense, que informó sobre la antorcha de fusión con encabezados como: “Ciencia de la era espacial atomizará los desechos contaminantes” (*Washington Post* del 26 de noviembre de 1969) e “¿Inundado de basura? ¡Evapórela con la fusión!” (*New York Times* del 15 de marzo de 1970).

En una primera aplicación, el flujo energético de plasma producido en reactores de fusión se usaría para la vaporización de choque (la propagación de ondas de choque) e ionización de un sólido, tal como basura o piedras. Luego se usarían técnicas de separación para “dividir las especies iónicas según su número o masa atómicas”. Eastlund y Gough notaron que había varias técnicas de separación posibles, entre ellas el enfriamiento electromagnético del flujo de plasma, la recom-

binación selectiva o el intercambio de cargas.

En el segundo caso, microcantidades de elementos seleccionados se inyectarían al plasma de la antorcha de fusión, lo que permitiría controlar la frecuencia e intensidad de la radiación emitida. Por ejemplo, podría hacerse que el plasma generara radiación en la escala ultravioleta. Como la radiación ultravioleta puede absorberla el agua hasta una profundidad de cerca de un metro, podría entonces absorberse en el fluido de trabajo para esterilizar o desalar agua en grandes volúmenes, procesando aguas negras o la conversión directa en electricidad (a través de celdas de combustible). Este método elimina el problema de tener que transferir calor de una *superficie* al cuerpo de un fluido, lo cual limita el calor de proceso.

### Para que funcione el plasma

En su escrito de 1969, Eastlund y Gough presentan ideas detalladas y ecuaciones matemáticas de la composición atómica del plasma, su velocidad de flujo y la pérdida de energía. La región II en el diagrama de la antorcha (**figura 5a**) está diseñada como la zona donde se aísla cualquier neutrón producido por la fuente de fusión (región I), y en especial con el ciclo de fusión del deuterio y tritio, atrapándolo en un manto de litio (**figura 5b**). La densidad, temperatura y velocidad de flujo del plasma funcional resultante en la región III, al igual que las del plasma a lo largo de la antorcha de fusión, serían controladas por métodos que ya fueron investigados en 1969.

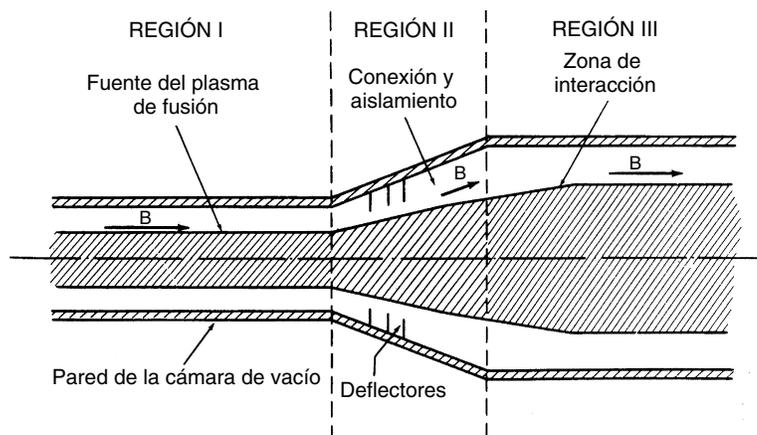
En su escrito de 1971, Eastlund y Gough incluyeron un diagrama de una antorcha de fusión para reciclar desechos sólidos, la cual, según ellos, encajaría “de forma muy natural en el plan general” de las instalaciones para el tratamiento de desechos sólidos que se planeaban en ese entonces. Los desechos sólidos serían desmenuzados, secados y clasificados, y entonces varias combinaciones se inyectarían en el plasma de la antorcha de fusión para vaporizarlas, disociarlas e ionizarlas. El producto final sería luego separado en elementos específicos para su colección y recuperación. La energía usada para producir el plasma también podría recuperarse, en gran medida porque el sistema funciona a temperaturas tan elevadas.

A medida que la energía del plasma es absorbida por la capa superficial del sólido, se produce una onda de choque que lo vaporiza e ioniza. Esto sólo es posible con un plasma de temperatura ultraelevada, donde el flujo de energía es mayor que la velocidad de choque en un sólido y la energía necesaria para vaporizar por unidad de volumen. El plasma resultante que sale de la región III de la antorcha de fusión se separaría entonces en sus elementos constituyentes a temperaturas más bajas.

Eastlund y Gough hablan de varios métodos para separar los sólidos ionizados en sus elementos constituyentes, todos los cuales podrían manejarse en una sola planta de recuperación. Las herramientas de separación electromagnética encabezan la lista. En su escrito de 1968 señalan que el interés principal es separar sólo unos cuantos elementos con una gran diferencia de masa. Por ejemplo, reducir mineral de óxido de

FIGURA 5a

### Diagrama de una antorcha de fusión

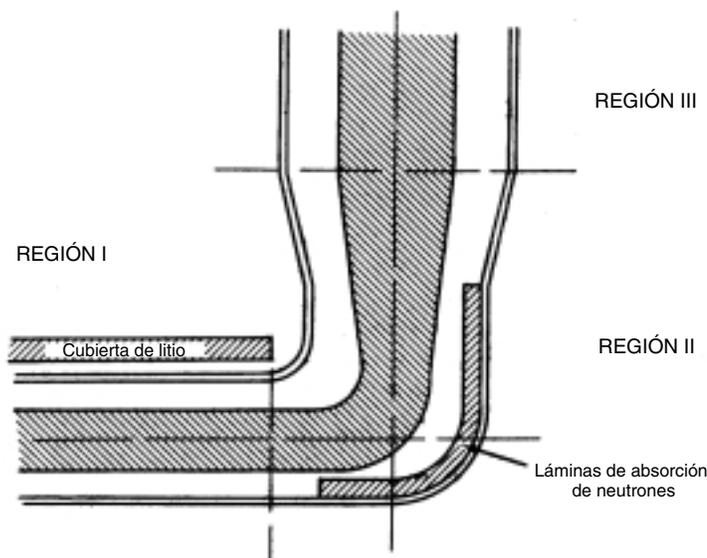


Fuente: *The Fusion Torch: Closing the Cycle from Use to Reuse* (La antorcha de fusión: Se cierra el ciclo, del uso al reuso), por Bernard J. Eastlund y William C. Gough, Washington, D.C.: Comisión de Energía Atómica de EU, 15 de mayo de 1969 (WASH-1132).

En esta configuración sugerida para una antorcha de fusión, el plasma se genera en la primera región, y a través de la segunda se transfiere a la zona de interacción, donde se lleva a cabo el procesamiento del plasma. La idea es que la región II use sólo parte del plasma producido en el aparato de fusión, de donde es succionado y alimentado a la antorcha al ajustar la forma e intensidad del campo magnético.

FIGURA 5b

### Refinación del plasma para la antorcha de fusión



Fuente: *The Fusion Torch: Closing the Cycle from Use to Reuse* (La antorcha de fusión: Se cierra el ciclo, del uso al reuso), por Bernard J. Eastlund y William C. Gough, Washington, D.C.: Comisión de Energía Atómica de EU, 15 de mayo de 1969 (WASH-1132).

Una cubierta de litio en la región I y las láminas de absorción de neutrones de la II remueven cualquier neutrón antes de que el plasma entre a la región III de la antorcha de fusión.

hierro ( $\text{FeO}_2$ ) requeriría separar el hierro (masa 56) del oxígeno (masa 16). Señalan, a la sazón, que los avances en la física de plasmas y la manipulación de haces habían hecho más atractiva la tecnología de separación electromagnética.

Otra tecnología de separación mencionada, que Eastlund y Gough pensaban que representaría un gasto de capital bajo y ninguno de energía, es el enfriamiento brusco del flujo de plasma mediante la inyección de un gas refrigerante, o pasando el plasma por una superficie fría o ampliado su flujo. Esto funcionaría para la reducción de minerales, en especial los minerales de alta calidad con impurezas; para la recuperación de elementos de mezclas eutécticas (combinaciones con puntos de fusión bajos), aleaciones y desechos metálicos de baja calidad. Este método de reciclaje podía usarse, decían Estlund y Gough, con la "tecnología de plasmas modificada" que ya estaba disponible en 1969.

La recombinación selectiva es otra técnica de separación, en la que la temperatura y la densidad del plasma mantendrían condiciones que le permitirían a algunos de los elementos en el plasma recombinarse en el muro de la cámara de la antorcha, mientras que otros "se van por el tubo". Este método está basado en las características de ionización de las especies envueltas.

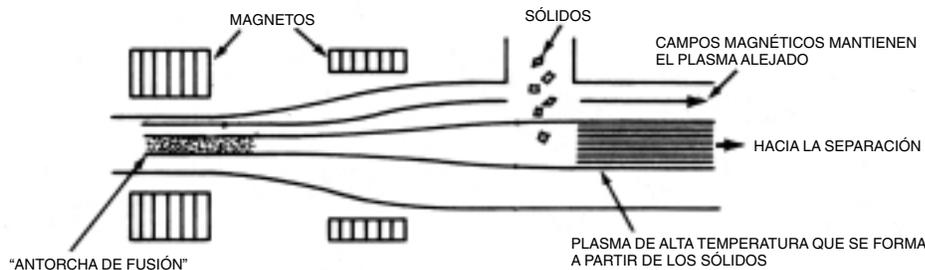
Una cuarta técnica sugerida por el escrito de 1969 es el intercambio de cargas. En este método, la corriente del flujo de plasma de la antorcha de fusión es rociada con un haz de gas, y un átomo o molécula en el gas inyectado reemplazaría un ión seleccionado del plasma. La combinación deseada se concentraría en el muro de la cámara de la antorcha, mientras que el resto del material se sacaría magnéticamente por el tubo.

El método de separación también dependería del estado al que la antorcha de fusión transformaría al sólido. Eastlund y Gough hablan de cuatro etapas diferentes: 1) la conversión del sólido a un estado gaseoso; 2) la disociación total de las moléculas; 3) elevar la temperatura del gas al grado en que alguno de los elementos se ionizan; y 4) elevar la temperatura del gas al grado en que todos los elementos se ionizan.

La capacidad de transformar desechos sólidos de forma selectiva en las etapas arriba mencionadas, hace posible emplear una combinación de métodos para reducirlos a sus elementos constituyentes del modo más barato. Por ejemplo, los elementos más pesados en los desechos sólidos (aluminio, cobre, magnesio, estaño, hierro, plomo, etc.) podrían ionizarse a 10.000 grados Kelvin y separarse, mientras que los más livianos

FIGURA 6

## Diagrama del procesamiento de desechos sólidos en una antorcha de fusión



*En este diseño para la región III de la antorcha de fusión, el plasma, al que se controla magnéticamente, fluye sobre los desechos sólidos inyectados, ionizándolos, de modo que pueden separarse en sus elementos constituyentes.*

Fuente: *Energy, Waste, and the Fusion Torch* (Energía, desechos y la antorcha de fusión). por Bernard J. Eastlund y William C. Gough, Washington, D.C.: Comisión de Energía Atómica de EU, 27 de abril de 1971.

(carbono, oxígeno e hidrógeno) podrían permanecer como gases neutrales y manipularse químicamente. Eastlund y Gough calculan que este proceso de ionización parcial podría ahorrar 35.000 kilovatios/hora de energía.

¿Existen obstáculos para el desarrollo de la fusión y la antorcha de plasma de temperatura ultraelevada? Sí, por supuesto que los hay. El plasma es difícil de manipular, requiere mucha energía y hay que desarrollar nuevos materiales. Pero ésta es la clase de problemas y desafíos que puede resolverse si uno quiere.

### ¿Adónde estamos hoy?

La conclusión del informe de 1969 de Gough y Eastlund dice:

Los plasmas de temperaturas ultraelevadas están disponibles *ahora*, aunque a un costo en energía. Se ha pensado poco en su uso potencial para aplicaciones industriales, y no se ha empleado la imaginación para ver cómo aprovechar al máximo las propiedades singulares de los plasmas de fusión que estarán disponibles en fuentes futuras de energía termonuclear controlada. Aunque no tratamos de minimizar la tremenda cantidad de investigación que aún hay que hacer en cuanto a la fusión misma y la física de la antorcha de fusión, entretiene especular sobre la visión que este concepto ofrece para el futuro: grandes ciudades impulsadas con electricidad limpia de reactores seguros de fusión que eliminan los desechos y generan las materias primas de la ciudad.

La visión está ahí; su logro no parece obstruirlo la naturaleza. Concretarla dependerá de la voluntad y el deseo del hombre de ver que se haga realidad.

Así que, ¿adónde estamos hoy? Aún no tenemos la fusión ni la antorcha de fusión. Como Eastlund le dijo a la Fundación de Energía de Fusión allá en 1975, la suerte de investigación

necesaria para desarrollar la antorcha de fusión no estaba llevándose a cabo. “Lo que se necesita —dijo— es que una agencia responsable de financiamiento le proporcione un sustento sólido a la física, la química y la tecnología de las aplicaciones de la antorcha de fusión”.

Treinta y cinco años más tarde, aún no existe ese compromiso en EU, pero algunas de las tecnologías que Eastlund y Gough exploraron se han incorporado a las antorchas de plasma de baja temperatura empleadas ahora en la industria. Universidades, laboratorios nacionales y muchas empresas privadas exploran la elaboración con plasmas y usan antorchas de plasma. Los plasmas son calentados con microondas o pasando un gas entre un arco eléctrico entre dos electrodos en un generador de plasma. La **figura 7** muestra las temperaturas de funcionamiento de la antorcha de fusión y de los métodos convencionales de transformación de materiales.

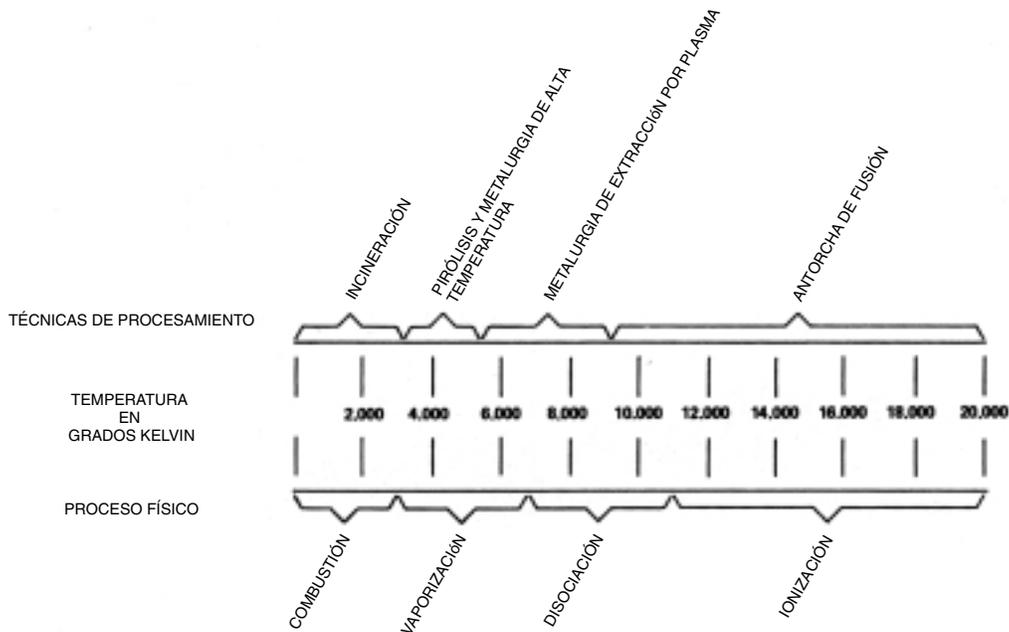
Los rusos y otros han usado una antorcha de plasma de baja temperatura para producir acero a partir de chatarra. Los germano-orientales y los soviéticos desarrollaron el proceso a fines de los 1960 y lo comercializaron en los 1970. En ese entonces, su antorcha de plasma de argón de corriente directa redujo el costo de la producción de acero por 400 dólares la tonelada, en comparación con los hornos convencionales de arco eléctrico de alta temperatura. También redujo el nivel de ruido, de 140 decibelios a sólo 40. La antorcha de plasma de argón produjo temperaturas de 15.000 grados centígrados, en comparación con un máximo de 3.600 generados por hornos convencionales que empleaban energía eléctrica.

Los japoneses han desarrollado el Sistema de Fusión de Ceniza Incinerada Tipo Plasma, con una planta de demostración en la ciudad de Chiba para reciclar las cenizas de incineradores y reducir los desechos sólidos.

Hoy Ben Eastlund tiene tres patentes para técnicas de transformación que podrían llevar a cabo las tareas delineadas en su artículo de 1969. En términos específicos, Eastlund más recientemente propuso que su Antorcha de Fusión—

FIGURA 7

## Temperaturas de operación para las técnicas de incineración y extracción



*La antorcha de fusión lleva las temperaturas de procesamiento miles de grados Kelvin por encima de las de los métodos tradicionales. Con la antorcha de fusión es posible la ionización, la cual despoja a los átomos de cualquier material que se procese de sus electrones.*

Fuente: *Energy, Waste, and the Fusion Torch* (Energía, desechos y la antorcha de fusión). por Bernard J. Eastlund y William C. Gough, Washington, D.C.: Comisión de Energía Atómica de EU, 27 de abril de 1971.

Procesador de Gran Volumen (LVPP), se empleara para reciclar combustible nuclear usado de las plantas nucleares civiles y de los desechos de los tanques del programa de armamentos del Departamento de Energía de EU. La LVPP emplearía un plasma de temperaturas ultraelevadas para extraer los componentes radiactivos de los desechos en bulto empleando un proceso “en seco”, a diferencia de las tecnologías convencionales que usan ácidos o metales fundidos. Un prototipo podría estar funcionando en dos años. Eastlund escribe en su sitio electrónico (<http://www.Eastlundscience.com>):

El Procesador de Gran Volumen puede usarse para separar los elementos que contienen los desechos uno por uno. Los elementos no radiactivos pueden liberarse en el ambiente luego de verificarse que no contienen elementos radiactivos. Los elementos radiactivos se recuperarían en una forma apropiada para su conversión a usos industriales, lo que reduciría de modo muy marcado la cantidad de material destinado a almacenaje geológico. Más aun, debido a que la temperatura de 10.000.000 grados de la LVPP puede ionizar cualquier material, la naturaleza indefinida del material en los tanques no presenta ningún problema.

La LVPP podría reducir de modo significativo el riesgo financiero de proceder con la limpieza de los tanques Hanford. El proceso de “química húmeda” requiere la cons-

trucción de instalaciones grandes que hay que financiar por adelantado. Pasarían años antes de que su funcionamiento pudiera juzgarse un éxito. Cualquier problema, tal como un escape o la explosión de un sistema menor, podría retrasar su puesta en marcha y costar millones en pagos de limpieza. La LVPP, un sistema relativamente pequeño, empieza a separar material radiactivo de una vez. El material se inyecta como una pasta aguada, se ioniza en 300 millonésimas de segundo y se separa en menos de 25 milisegundos. El material separado puede removerse tantas veces como sea necesario y, para muchos elementos, de forma continua para asegurar que nunca haya un inventario peligroso en el sistema. Cuando se hayan limpiado los tanques, la LVPP puede removerse con facilidad del sitio. De hecho, los tanques mismos podría ser procesados por la LVPP.

La antorcha de fusión, en la forma de la LVPP u otras, ofrece la promesa de suplirle nuevos recursos al mundo y de deshacerse de nuestra basura y desechos sin contaminar. Como Eastlund sugiere arriba, ¡la antorcha de fusión hasta puede convertir los contenedores de desechos nucleares en materiales útiles! ¿Qué esperamos? Cualquier ambientista de verdad, que de veras le preocupe el mundo, debía sumarse a la causa de la antorcha nuclear como tecnología para el siglo 21, en vez de arrastrarse hacia la ruina, las tinieblas y el frío de la Edad de Piedra.