

**Dr. Martín B. A. Crespi**

# Perspectiva energética de la humanidad

## ABSTRACT

*In the note transcribed here, Dr. Martín B. A. Crespi—who died a few days ago—stated his last reflections concerning mankind energy prospects thus foreseeing a possibly critical situation regarding supply of such item in the next decades. The possibilities offered by different energy sources to meet future world requirements are described here.*

Hace pocos días, mientras organizábamos el material periodístico de este número aniversario de *Energía 2001*, fuimos conmovidos por la noticia del fallecimiento del doctor Martín B. A. Crespi, desde hace tiempo amigo y colaborador de nuestra revista. Esta infausta circunstancia nos decidió a incorporar aquí esta nota, la última recibida del doctor Crespi, que reservábamos para una próxima entrega. En ella, el autor analiza las perspectivas energéticas de la humanidad, adelantándose —en tal vez no muchos años— a una etapa crítica de la provisión de este insumo estratégico y desentrañando las posibilidades que ofrecen los recursos que pueden brindar en el futuro las diversas fuentes de energía, algunas de ellas escasamente exploradas.

A lo largo de su historia, el hombre ha utilizado siempre las fuentes energéticas más baratas, cómodas y fáciles de conseguir y ha sustituido unas por otras siguiendo estos mismos criterios. La política energética de la sociedad moderna, una vez despojada de su ropaje tecnológico, no difiere mayormente de la del primitivo recolector de leña. Sin embargo, hay un reconocimiento creciente en los últimos años de que este enfoque eminentemente pragmático deja de ser válido cuando se alcanzan niveles de consumo del orden de los que se están manejando ya en muchas regiones y de los que se prevén para el futuro. Esto ha incrementado el interés en diversificar la oferta abriendo nuevas opciones, ha ampliado los esfuerzos de investigación y desarrollo en esa dirección y ha planteado la necesidad de estudiar a fondo y en forma integral la interacción energía-sociedad para ir adecuando a ella la evolución futura.

### El problema energético

Lo que se llama hoy día el "pro-

blema energético" puede describirse por ciertas características esenciales. La primera de ellas es la dependencia absoluta entre el desarrollo de la sociedad y el consumo de energía. El consumo actual de todas las formas comerciales (petróleo, carbón, gas, hidroelectricidad, etc.) corresponde aproximadamente a una energía térmica primaria equivalente a 10 barriles de petróleo por habitante y por año. En términos de trabajo humano, esto equivale a unos 50 esclavos virtuales por habitante del mundo, o sea a una "población energética" total de 225.000 millones de personas, trabajando continuamente las 24 horas, lo que muestra en qué grado el hombre es un parásito energético. Se ha estimado que si hubiese dependido solamente de su propia capacidad fisiológica de trabajo, como las demás especies del reino animal, la humanidad no habría sobrepasado los 10 millones de habitantes en todo el planeta.

El segundo aspecto característico es que, a pesar de ese elevado consumo total, las cuotas energéticas de



El doctor Martín B. A. Crespi, recientemente fallecido, era Director del Departamento de Prospectiva y Estudios Especiales de la CNEA y miembro de la Comisión Directiva de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear. Se graduó en Química en la UNBA e ingresó en 1952 a la CNEA, donde se desempeñó como Director de Investigaciones en 1963-73. Fue profesor en universidades nacionales y extranjeras, funcionario, experto y consultor del Organismo Internacional de Energía Atómica de las Naciones Unidas y asesor del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Desde 1965 formó parte de la Comisión Nuclear de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, que presidió en 1971-75 y en 1981 fue elegido miembro del Comité Consultivo de la Comisión Interamericana de Energía Atómica de la Organización de Estados Americanos.

diversos grupos étnicos son muy desiguales, por lo que el mundo en su conjunto no está bien abastecido: el 70 % de la población consume solamente el 10 % de la energía que circula por él. Esto es una consecuencia de la intensificación del uso de energía en los últimos dos siglos, en los cuales los países de mayor desarrollo económico, técnico y militar cumplieron un proceso de realimentación positiva que fue consolidando su poder y la desigualdad distributiva.

La combinación de estos dos aspectos determina la característica fundamental del problema energético: la generación de expectativas y la necesidad de satisfacerlas. Las tendencias de los datos energéticos de las últimas décadas muestran que la evolución se va haciendo en la dirección correcta, aunque muestran también que la velocidad con que se han efectuado hasta ahora los cambios no es suficiente para que el proceso se

realice sin tensiones sociales.

A estos factores básicos del problema energético se añade en la actualidad el hecho de que el suministro de la fuente principal empleada, el petróleo, está entrando en crisis y, además, se encuentra vinculado con factores geopolíticos de primera importancia. Es esencial, sin embargo, comprender que esto es un factor circunstancial que pierde perspectiva cuando se lo examina en función de la evolución a largo plazo de la humanidad. A ese fin, en la Fig. 1, cuya abscisa cubre una escala de varios miles de años, se aprecia el significado relativo de los combustibles fósiles, que aparecen como responsables de una etapa de esta evolución pero carentes de significación en el largo plazo. Esto no implica desconocer su importancia inmediata, ya que en la actualidad el 65 % de la energía primaria mundial consumida proviene de hidrocarburos y el 95 % de combustibles fósiles, sino simplemente re-

calcar que la solución definitiva no pasa por ellos.

#### Las necesidades futuras

La forma de la curva de demanda total de la Fig. 1 caracteriza el crecimiento en un ambiente limitado (Cf. 'A Simple Substitution Model of Technological Change, en J. C. Fisher y R. H. Pry, Industrial Application and Technological Forecasting, John Wiley and Sons, 1971, y W. Haefele y W. Sassin, Energy Strategies, RR-76-8, International Institute for Applied Systems Analysis, Marzo 1976). Aceptando que la humanidad evoluciona siguiéndola (otras curvas posibles, más pesimistas, terminan en caídas más o menos bruscas debidas a hambrunas generalizadas y conflictos bélicos), ésta se encuentra ahora en un punto de la rama exponencial ascendente previa al comienzo de la estabilización.

Para la condición estable final, el requerimiento energético total es el

*Con la estructura actual de la demanda, el 75 % de la energía primaria se consume para producir calor y tracción. El resto se usa como electricidad.*

producto de la población asintótica por el consumo individual per cápita. Una hipótesis no extrema para la primera es 15.000 millones de habitantes (poco más de tres veces el valor actual). Para un consumo promedio individual del orden del actual de Europa Occidental, esto lleva a una demanda total de 8 veces la actual, factor que se eleva a 20 si en lugar del consumo individual europeo se toma el de Estados Unidos.

Examinemos someramente qué fuentes pueden cubrir esas necesidades. En la actualidad, la estructura de la demanda es tal que aproximadamente el 75 % de la energía primaria se consume como combustibles de uso directo en producción de calor y tracción y el 25 % restante como electricidad (esto incluye los combustibles empleados para producir electricidad y el equivalente térmico de la que se genera directamente como tal). El primero de estos consumos se cubre casi exclusivamente por medio del petróleo y del gas natural, cuya característica esencial a ese respecto es que son transportables. Al agotarse éstos, si se dispusiese solamente de instalaciones fijas productoras de electricidad (la llamada "economía totalmente eléctrica") o de electricidad y calor (por ejemplo, reactores nucleares de alta temperatura), sería necesario sintetizar "in situ" combustibles transportables para cubrir los usos recién mencionados. La alternativa que se considera más apropiada para el largo plazo, tanto por la abundancia de materia prima cuanto por la mínima contaminación que produce, es el llamado "ciclo del hidrógeno", en el cual se obtendría hidrógeno a partir del agua por electrólisis o por métodos térmicos y se regeneraría ésta al quemarlo. Previamente habría un período de transición basado en combustibles líquidos y gaseosos sintéticos obtenidos por hidrogenación del carbón.

Es claro entonces que cualquier fuente energética puede, en princi-

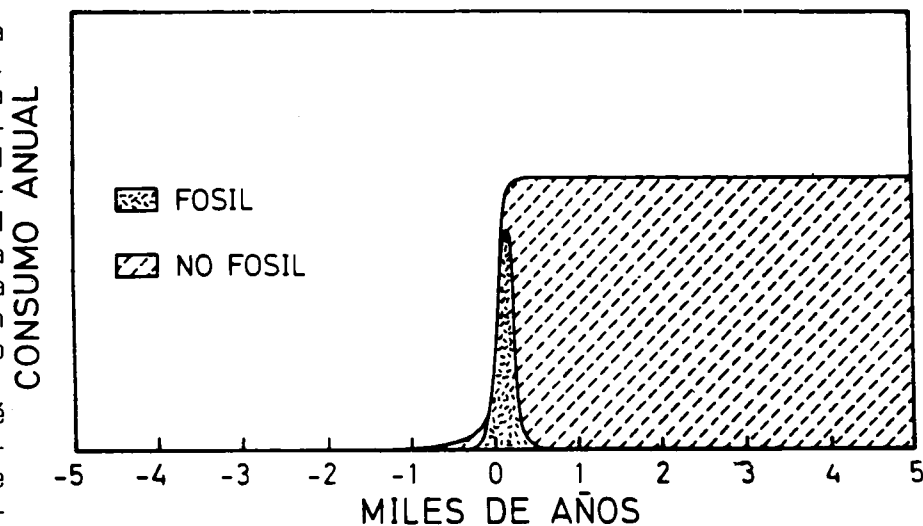


Fig. 1. — Los combustibles fósiles en la evolución humana. El punto cero de la abscisa corresponde al presente.

pio, proveer todo el espectro de necesidades de la humanidad. Esto hace que la potencialidad de una fuente determinada sea función, en primera instancia, de su magnitud. Sobre esta base, en la Tabla I, para la cual se han tomado principalmente las estimaciones aproximadas aceptadas por la Conferencia Mundial de la Energía al terminar la década de los años 70, se da el potencial energético del mundo en unidades Q ( $1 Q = 10^{18}$  Btu =  $10^{21}$  Joule). Cabe hacer notar al respecto que el consumo actual total de energía primaria es aproximadamente 0,3 Q/año, de modo que los consumos asintóticos supuestos más arriba cubren un rango de 2,5 a 6 Q/año.

En primer lugar, se observa que el carbón es el combustible fósil más abundante. En principio, por lo tanto, la posibilidad de seguir usando combustibles fósiles por un período prolongado existe, como se indicaba en la Fig. 1, ya sea empleando directamente el carbón o sintetizando hidrocarburos a partir de él. Sin embargo, es probable que el consumo se vea limitado por razones ecológicas cuando quede aún mucho carbón por utilizar (según algunas opiniones, antes de la mitad del siglo próximo).

La segunda fuente no renovable es la nuclear, para la cual existen diversas variantes. Hasta ahora se están utilizando comercialmente sólo reactores térmicos de paso único, que es una manera muy rudimentaria de usar el uranio, ya que se aprovecha menos del 1 %. Esta utilización puede duplicarse (aproximadamente) aumentando el número de pasos mediante el reciclado, en el mismo tipo de reactor, del plutonio producido simultáneamente con la electricidad, pero es claro que el recurso sigue siendo relativamente pequeño. Eso no le quita importancia en el futuro inmediato, en que se utilizará para producir solamente una fracción de la energía eléctrica, ya que ésta es la cuarta parte de la energía primaria consumida, pero en esta forma carece de significación a largo plazo.

La situación cambia radicalmente cuando se tienen en cuenta las tecnologías avanzadas que, en lugar de utilizar sólo el 1 % del uranio, emplean el 60-70 % mediante el uso de reactores reproductores de combustible. El más importante actualmente de estos ciclos reproductores de combustible nuclear, para el cual existen ya centrales comerciales de demostración, es el ciclo uranio-plutonio que

*Con la fisión reproductora, el aprovechamiento de los minerales de uranio y torio puede multiplicarse unas 140-150 veces.*

emplea neutrones de alta energía en los llamados 'reactores reproductores rápidos'. En menor estado de desarrollo existe también otro que permite incorporar al torio como combustible nuclear, ya que a partir de él puede obtenerse otro material fósil, el uranio-233.

Con la fisión reproductora, los minerales de uranio de los yacimientos que se utilizan actualmente, y los de torio de leyes similares, multiplican el potencial de la fisión nuclear por un factor 140-150. Pero la cuestión no se agota ahí, porque con esta tecnología se hace posible utilizar fuentes mucho más diluidas, ya que puede aumentarse mucho el costo sin perder economicidad. La revalorización de estas fuentes diluidas aumenta enormemente el recurso. Suponiendo que pudiera aprovecharse solamente el 1 % del uranio y del torio existente en el primer kilómetro de la corteza terrestre se llega a una estimación del orden de  $10^7$  Q que, a los fines humanos, es prácticamente infinita.

Lo mismo ocurre con otra de las formas avanzadas de la energía nuclear, la fusión de isótopos de hidrógeno para dar helio. Esta no se ha realizado aún en el mundo en forma controlada con balance positivo de energía, pero los progresos habidos en los últimos años sugieren que su factibilidad se probará en la presente década.

Para la fusión deuterio-tritio, que será probablemente la primera que se utilice por su menor exigencia de temperatura, el factor limitante es que el tritio no existe prácticamente en la naturaleza y debe obtenerse artificialmente. Para esto se emplea litio, que forma tritio al absorber neutrones. Como en el caso anterior, podemos pensar que se utiliza solamente el litio de los yacimientos o también el disuelto en los océanos, y se ve en la Tabla que, para esta última posibilidad, y suponiendo que se emplee solamente el 1 % del litio

**Tabla 1**

**RECURSOS ENERGETICOS MUNDIALES**

(En unidades Q.  $1 \text{ Q} \cong 16^{21}$  Joule)

Fuentes	Reservas	Recursos
Energía fósil		
Carbón, turba, etc.	18	280
Petróleo	2,6	13
Gas Natural	2,4	10
Rocas portadoras (esquistos bituminosos, etc.)		30
Energía nuclear		
Fisión térmica (U < 130 U\$/Kg)	1	2
Fisión reproductora (Id.)	150	300
Fisión reproductora (1 % U y Th rocas y océanos)		$10^7$
Fusión D - T (Li de yacimientos)		2000
Fusión D - T (1 % Li océanos)		50000
Fusión D - D (1 % D océanos)		$10^8$
Energía geotérmica		
Tecnología actual		0,4 ?
Nuevas tecnologías		2000 - 40000
Energía solar		
Hidroeléctrica *		0,1/año
Directa (2 % sup. cont.)		15/año
Eólica*		1/año?
Bioenergía		0,15/año
Gradiente térm. océanos		3,5/año
Energía de olas*		0,08/año?
Energía mareomotriz*		0,003/año

\* = Equivalentes térmicos

disuelto, se tiene un recurso de decenas de miles de Q. En cuanto a la fusión deuterio-deuterio, se llega a los 100 millones de Q con el 1 % del deuterio de los océanos. La importancia de este recurso justifica, obviamente, los esfuerzos que se realizan para que la fusión sea una realidad como fuente energética.

En el caso de la energía geotérmica, las fuentes explotables con las tecnologías actuales son de poca significación, pero el recurso aumenta mucho si se consideran nuevas tecnologías, por ahora no demostradas, para extraer calor de rocas secas calientes, y aun del mismo magma, realizando yacimientos geotérmicos artificiales mediante inyección de agua. En cuanto a la hidroelectricidad, su magnitud tampoco es significativa en un panorama a largo plazo, como se ve en la Tabla. Por supuesto, por tratarse de una fuente renovable, seguirá en uso, aunque su contribución sea marginal.

El empleo de la radiación solar directa presenta un potencial enorme, ya que la energía incidente en menos del 2 % de la superficie de los continentes cubriría con creces los requerimientos de cualquiera de las alternativas que hemos mencionado, y ello con una fuente esencialmente renovable. La dificultad principal reside en la necesidad de cubrir la superficie utilizada con materiales apropiados para la captación, lo que involucra grandes cantidades de éstos y puede llegar a ser muy costoso. Esto no es óbice para que se utilice ya intensamente cuando las condiciones económicas o técnicas lo posibilitan.

En el caso de la energía eólica, que es una forma indirecta de la energía solar, están también muy extendidas las aplicaciones de baja potencia y su potencial es muy grande en las regiones de la Tierra de vientos intensos.

Otra utilización indirecta de la energía solar es la bioenergía que, en

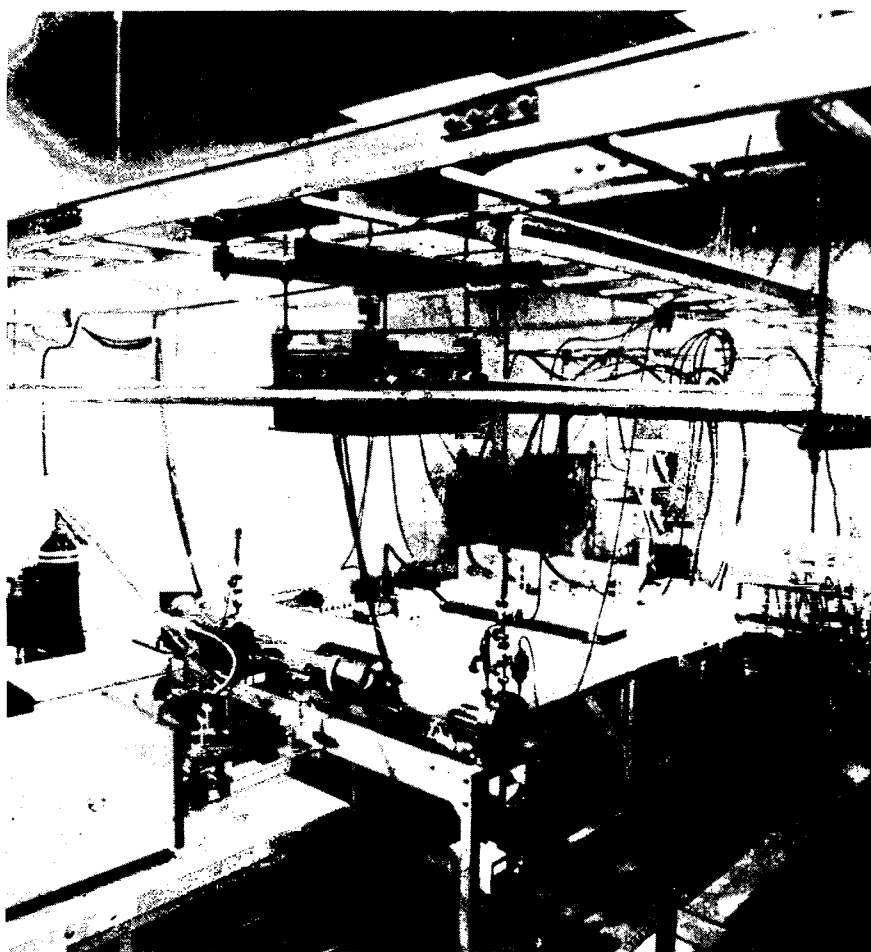


Fig. 2. — Theta-pinch lineal utilizado en la Comisión Nacional de Energía Atómica para producción de plasmas de interés termonuclear. El funcionamiento se basa en realizar una descarga eléctrica de aproximadamente 350 kA y 2  $\mu$ s de duración sobre la espira única que se ve en la fotografía. Esta espira rodea un tubo de cuarzo que contiene hidrógeno y en el cual se produce el plasma por efecto transformador. El banco de capacitores que alimenta la descarga almacena una energía de 12 kJ a una tensión de 40 kV.

forma de leña, fue una de las primeras fuentes empleadas por el hombre. La posibilidad de su empleo sistemático en gran escala encuentra la dificultad de que la energía total involucrada en la fotosíntesis no es muy grande (ver Tabla 1) y, además, de que ésta tiene un rendimiento de aprovechamiento solar por unidad de superficie muy bajo, lo cual hace que la producción de materiales energéticos a partir de biomasa esté acompañada siempre de un volumen grande de desechos y utilice muy deficientemente la superficie en comparación con la captación directa. Un ataque

directo al fondo de esta cuestión se está realizando en varios laboratorios del mundo en los cuales se estudian los mecanismos de la fotosíntesis con el objetivo final de llegar a sistemas químicos fotosintéticos ("cloroplastos artificiales") que puedan utilizarse con una densidad de captación superficial mayor que la que se puede obtener con los vegetales y, por lo tanto, con rendimientos más elevados.

En cuanto a la energía obtenible de los océanos, otra fuente solar indirecta es la que resulta de utilizar la diferencia de temperatura entre las

capas superficiales, calentadas por el Sol, y las que se encuentran a cierta profundidad. En la Tabla 1 se ve que su potencial es significativo. Esto no ocurre con las olas y las mareas, que son de origen esencialmente gravitatorio y carecen de importancia a nivel mundial, aunque existen, especialmente en el caso de las mareas, lugares en que la explotación es particularmente favorable, y hay ya centrales eléctricas en funcionamiento en Francia y en Rusia.

Cuando se examinan los datos de la Tabla 1 teniendo en cuenta los ejemplos de escenarios asintóticos de 2 a 6 Q/año dados más arriba, se ve claramente que la energía nuclear, la solar y tal vez (porque en este caso la posibilidad de explotación intensiva de tecnologías avanzadas es más dudosa) la geotérmica, son las únicas fuentes de dimensión no crítica de que dispone la humanidad para basar su desarrollo asintótico. Es evidente, entonces, la conveniencia de ir estudiando sus aspectos básicos y de aplicación junto con las de utilización inmediata y con las que aparentemente cubrirán el paso intermedio entre el estado actual y el horizonte asintótico, como la gasificación y liquefacción del carbón, la explotación de minisaltos hidráulicos, y otras.

En la Argentina están comenzando a darse las bases para ello. En el campo de la energía nuclear hay ya un programa en ejecución que ha llegado a la producción comercial de energía eléctrica y que, en su etapa actual, está centrado en alcanzar la autosuficiencia en materia de energía nuclear de fisión con reactores térmicos. En este programa no se pierden de vista las posibilidades más lejanas mencionadas más arriba, realizándose estudios evaluativos sobre reactores reproductores y sobre la utilización del ciclo del torio e investigaciones teóricas y experimentales sobre diversos aspectos básicos de la fusión nuclear, estos últimos, en la Comisión Nacional de Energía Atómica (Fig. 2)

-44 ENERGIA 2001



Fig. 3. — Prototipo de laboratorio de concentrador solar fijo de espejo facetado en ensayo en la Comisión Nacional de Energía Atómica. El reflector está formado por segmentos espejados largos y angostos ubicados sobre un semicilindro fijo. La posición de cada segmento está calculada para que el foco del concentrador recorra una semicircunferencia al desplazarse el Sol y, de este modo, pueda recolectarse continuamente el calor en un tubo que se mueve según esa circunferencia y por el cual circula un líquido. El prototipo tiene un área de intercepción de  $4,6 \text{ m}^2$  y produce una potencia pico de  $2,3 \text{ kW}$  térmicos.

y en la Universidad de Buenos Aires. Se está comenzando también a trabajar en el desarrollo de otras energías no convencionales, entre ellas la eólica, la solar y la bioenergía, acción en la que colaboran varias instituciones con la coordinación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología. En particular, la CNEA participa en los campos solar y eólico, considerando que es importante para ella, dado el carácter complementario que la energía nuclear y la solar presentan en el largo

plazo, tener conocimiento directo de su estado de evaluación a través de grupos de trabajo propios (Fig. 3). Estas y otras iniciativas, cuya mención alargaría demasiado esta nota, junto con la intensificación del uso de las fuentes convencionales clásicas, configuran un marco de referencia que, si se persevera en el esfuerzo, da al país la posibilidad de enfrentar el desafío de su desarrollo mediante una política energética racional y coherente. □