



JORNADAS NACIONALES DE ENERGIA

C. P. A. Biblioteca	
ARCHIVO FUNDACIONES	
Nº	AÑO
1	1980

**Realizadas en Santa Fe, Argentina
6 al 10 de Octubre de 1980**

TOMO I

Panorama general de la crisis energética mundial y su incidencia en lo nacional.

Fuentes convencionales y no convencionales de Recursos Energéticos.

Fuentes convencionales de Energía: Petróleo, Carbones fósiles, Gas natural, Hidroelectricidad, Nuclear.

Información general

Conclusiones

ORGANIZARON: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
FUNDACION FAC. DE ING. QCA.
ASOCIACION ARGENTINA DE ING. QUIMICOS (SANTA FE)

PANORAMA Y OPCIONES ENERGETICAS

M.B.A. Crespi

Comisión Nacional de Energía Atómica

Buenos Aires, Argentina

Una constante de la historia del consumo de energía por el hombre es que éste ha utilizado siempre las fuentes que le resultaban más cómodas, baratas y fáciles de conseguir, sin preocuparse demasiado por el futuro. En ese aspecto, la política energética de la sociedad moderna, una vez desprovista de su ropaje tecnológico, no es menos pragmática que la del primitivo recolector de leña.

No cabe duda de que esta forma de encarar la cuestión ha rendido sus frutos al posibilitar el gran salto energético dado por la humanidad en los últimos dos siglos. Al mismo tiempo, se ve cada vez más claro que no garantiza que el desarrollo se mantendrá en el futuro, ya que los crecientes niveles de consumo plantean problemas de agotamiento acelerado de algunos recursos y obligan a tener en cuenta otros aspectos de la producción energética además del económico, como, por ejemplo, su influencia sobre el medio ambiente.

La creciente conciencia de esta situación en los últimos años ha incrementado el interés de diversificar la oferta energética abriendo nuevas opciones, ha ampliado los esfuerzos de investigación y desarrollo en ese sentido y ha planteado la necesidad de estudiar a fondo, y en forma integral, la interacción energía-sociedad. En esta exposición vamos a comentar algunos aspectos básicos de interés para el estudio de esta interacción y, en función de ellos, a discutir el panorama de disponibilidad de recursos que enfrenta la humanidad tal como aparece al presente.

El problema energético.

Todos sabemos, aunque sea en una forma cualitativa e intuitiva, que la energía es muy importante para la sociedad. Una manera de cuantificar esta importancia es tratar de estimar en qué grado el hombre utiliza, en su vida diaria, energía que es incapaz de producir por sí mismo.

Un adulto que no haga un trabajo físico exagerado está satisfecho con una cuota alimenticia de aproximadamente 2500 kcal/día, que constituye su fuente energética propia. De éstas, consume para mantenerse vivo unas 1700 kcal/día, para su metabolismo basal, de modo que la diferencia, 800 kcal/día, es la energía primaria bruta promedio de que dispone por sí mismo, como máqui-

na fisiológica, para realizar trabajo.

El consumo actual de energía comercial en todas sus formas (petróleo, carbón, gas, hidroelectricidad, etc.) corresponde aproximadamente a una energía térmica primaria equivalente de 2 kWaño/año en promedio por habitante del mundo, o sea 41000 kcal/día. Si dividimos esta cantidad por la recién estimada, obtenemos el equivalente en seres humanos de la energía primaria comercial consumida per caput o, lo que es lo mismo, el número de esclavos virtuales que tiene cada habitante de la Tierra a su servicio como consecuencia de utilizar energía externa a él. Este número resulta del orden de 50 como promedio mundial, y como en la actualidad hay unos 4500 millones de habitantes en la Tierra, la población energética equivalente es de 230000 millones trabajando las 24 horas del día.

El resultado muestra claramente la intensidad con que el hombre es un parásito de la Naturaleza. Su situación es única, ya que sólo la especie humana ha logrado utilizar fuentes de energía ajenas a ella en forma premeditada y sistemática; todas las demás emplean exclusivamente su energía fisiológica, que captan en forma natural, directa o indirecta, del Sol.

Este privilegio ha sido determinante para la evolución de la humanidad. Si se examina la densidad de población alcanzada por el hombre cuando sólo podía consumir alimentos crudos que recolectaba o cazaba, como hacen todavía las demás especies del reino animal, y se multiplica esta densidad por la superficie continental comprendida entre los límites de latitud en que la temperatura posibilitaría la supervivencia, se concluye que la capacidad de la Tierra virgen para la especie humana es de unos 10 millones de habitantes. La situación cambió radicalmente con el descubrimiento del fuego, que permitió hacer digeribles muchos alimentos (por ejemplo, semillas) que antes no lo eran y aumentó el número de cazadores-recolectores que podía sustentar una superficie silvestre determinada, y sobre todo al inventarse la agricultura y usarse así la energía solar y la de los animales de labranza en forma sistemática para la producción de alimentos. Es así que el empleo de fuentes de energía externas al hombre fue decisivo para el aumento de las posibilidades habitacionales del planeta y, por lo tanto, para el desarrollo de la sociedad. El hecho de que hayamos llegado ya a las 4500 millones de habitantes es suficientemente elocuente al respecto.

Sin embargo, y sin que lo anterior deje de ser cierto, si se examinan las cosas más de cerca se observa que el efecto sobre el aumento de la población es muy marcado cuando el resultado principal del uso de la energía es la mayor

producción de alimentos, pero se atenúa rápidamente una vez alcanzados niveles que garantizan la supervivencia. Esto está ilustrado en la figura 1 (tomada de W. Haefele y W. Sassin, *The global energy system*, *Annual Review of Energy*, 2, p. 15, 1977), en que se ha representado la longevidad en función del consumo individual de energía comercial (datos de 1973). Se ve que al comienzo de la curva la cantidad de energía usada es muy poca y la expectativa de vida apenas de 40 años, pero que ésta sube muy rápidamente al aumentar el consumo y que, para el valor del promedio mundial actual, la longevidad ya es similar a la de los países muy desarrollados, cuyo consumo es de 3 a 6 veces este promedio.

Corresponde aclarar que la cuota energética individual es mayor de lo que indican los números de la abscisa, porque se calcula normalmente sobre la base de la energía comercial y no tiene en cuenta los aportes no comerciales, como el trabajo humano y animal, la leña recolectada directamente por el usuario, los excrementos animales usados como combustible, etc., que son despreciables para los valores de consumo de los países desarrollados pero no para los que predominan en los de bajo consumo y economía de subsistencia eminentemente agraria. Por ejemplo, en el caso de la India, que es uno de los pocos países en que hay datos sobre estos aspectos que permiten estimar su contribución, el consumo individual real, sin contabilizar la influencia de los efectos directos de la insolación, relativamente elevada, está más próximo al 25% del promedio mundial que al 10% que resulta de calcularlo tomando solamente la energía comercial (cf. R. Revelle, *Energy in rural India*, *Science*, 192, 969, 1976). Esta consideración es importante para comprender mejor la situación actual en relación con la curva de la figura 1, pero no modifica la conclusión general que ésta ilustra, a saber, que la cuota energética mundial promedio es ya lo suficientemente alta para superar la limitación primaria respecto del crecimiento de la especie y no constituye un freno natural para el aumento de la población.

Al mismo tiempo, la distribución de las cuotas vigentes en los diversos grupos étnicos es muy desigual, y para la mayoría de ellos es muy baja y no permite el acceso a las comodidades mínimas que se asocian usualmente con la vida civilizada. Aproximadamente el 90% de la energía en juego en el mundo es consumida por el 30% de su población. Volviendo a la energía comercial, y en términos del número de esclavos virtuales mencionado más arriba, la Tabla 1 muestra los valores correspondientes a algunos países en 1976. Esta situación es una consecuencia de la intensificación del uso de los combustibles

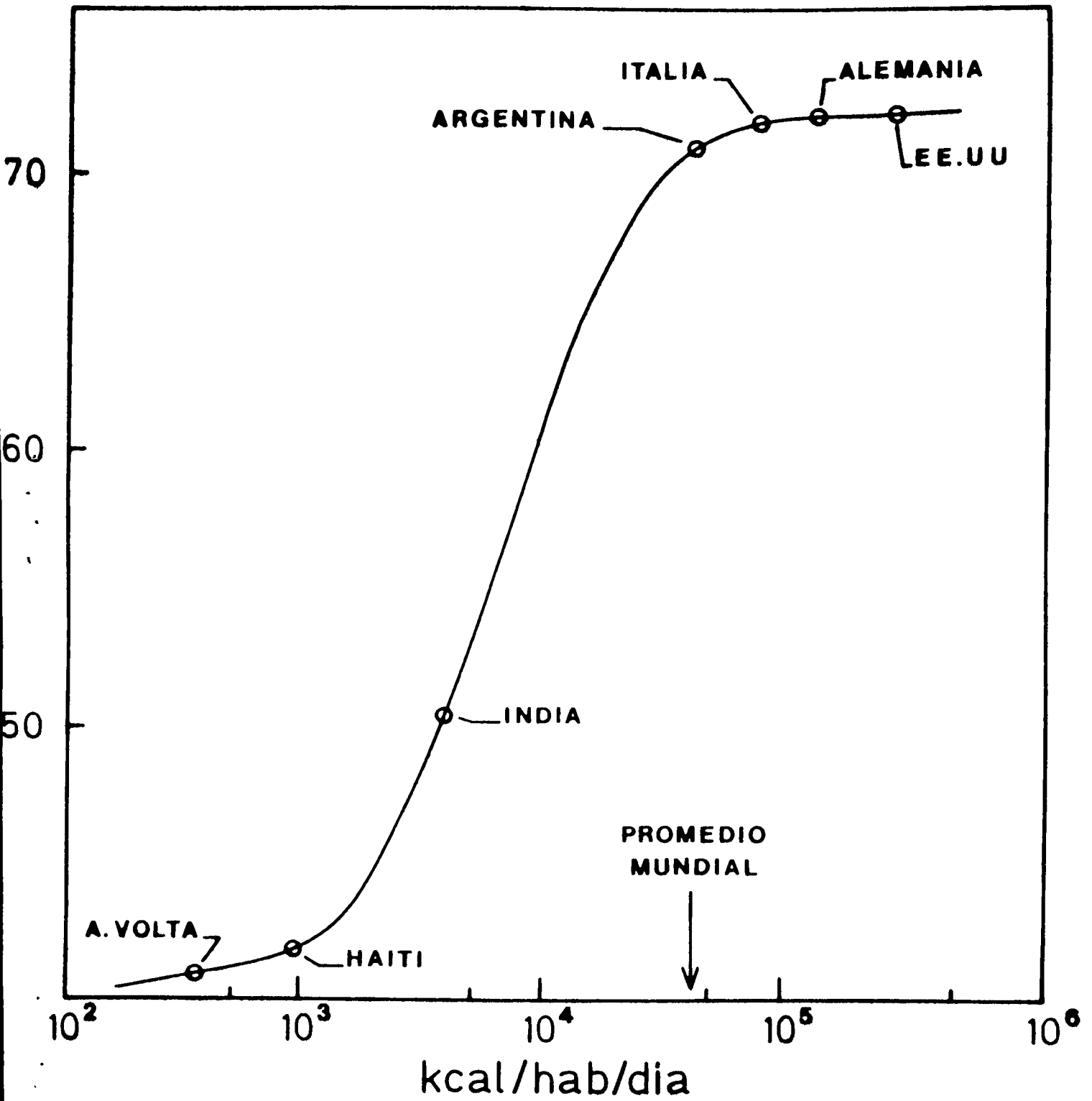


Fig. 1. Longevidad vs. consumo per caput.

fósiles transportables en los últimos dos siglos. Estos fueron accesibles principalmente a los países de mayor desarrollo económico, técnico y militar, los cuales acrecentaron su poder al emplearlos y fueron cumpliendo así un proceso de realimentación positiva que consolidó cada vez más las diferencias distributivas.

La combinación de las circunstancias recién mencionadas genera automáticamente un hecho objetivo cuya presencia es una de las características esenciales y dominantes del problema energético actual: las expectativas insatisfechas y las necesidades que éstas originan.

Las tendencias de las cifras energéticas globales de la década 1960-70 muestran la realidad de estas expectativas y de los mecanismos que tratan de satisfacerlas. Por ejemplo, el crecimiento anual acumulativo del consumo total de energía en el mundo en ese período fue del 5% y el de la población se mantuvo en el 2%, de manera que el consumo per caput creció a aproximadamente el 3%. Pero, aunque esto sea positivo, la situación dista mucho de estar claramente en vías de solución, principalmente porque la velocidad con que se producen los cambios no es suficientemente grande para asegurar un mejoramiento continuo libre de tensiones sociales. El caso de América Latina es un ejemplo típico. En la misma década 1960-70, el consumo creció al 7,5% anual acumulativo y la producción a menos del 2%. En esa oportunidad los requerimientos se cubrieron aumentando la importación y disminuyendo la exportación de energía por la región, pero es claro que las expectativas excedieron con mucho a las posibilidades locales, y que el mismo problema hubiera sido insoluble por ese camino a nivel mundial.

Tabla 1	
Esclavos virtuales por habitante (Energía comercial, 1976)	
Estados Unidos	300
Alemania Federal	150
Italia	70
Mundo	53
Argentina	45
Portugal	22
Brasil	14
India	5
Haití	0,8
Alto Volta	0,3

Los cuatro factores que acabo de revisar someramente son, a mi juicio, los que configuran el verdadero problema energético, a saber: i) la imprescindibilidad de la energía para la existencia de la sociedad; ii) la desigualdad de su distribución; iii) las expectativas que estos dos hechos originan; iv) la dificultad de mantener un ritmo de oferta adecuado a estas expectativas. En el momento particular actual de la historia de la humanidad, a estos factores básicos se añade la circunstancia de que el salto hacia consumos energéticos masivos se produjo como consecuencia de la utilización de combustibles fósiles, principalmente petróleo, y que este suministro está entrando en crisis y, además, vinculado a factores geopolíticos de primera importancia. Pero este es, en realidad, un hecho circunstancial, un accidente momentáneo que, aunque haya sido el factor desencadenante que haya hecho ver las cosas con más claridad y haya replanteado la situación energética económica internacional, pierde perspectiva cuando se lo examina en función de la evolución a largo plazo de la humanidad. Esto no significa quitarle importancia, ya que en la actualidad el 65% de la energía primaria mundial consumida proviene de hidrocarburos y el 95% de combustibles fósiles, sino simplemente recalcar la necesidad de no confundir los aspectos realmente fundamentales de la cuestión energética con los problemas de suministro de una fuente particular, como, lamentablemente, ocurre aún con frecuencia en muchos ambientes especializados.

Las necesidades futuras.

Partiendo del panorama así esbozado, vamos a tratar de estimar cuáles serán los requerimientos futuros del mundo.

Estos pueden estimarse en función de dos factores, a saber, el aumento de la población y del consumo per caput. Con respecto a la población, se han hecho y se hacen hipótesis muy variadas sobre su posible evolución. La pendiente de crecimiento de los últimos años corresponde a un coeficiente promedio de 1,9% anual acumulativo, con un tiempo de duplicación de aproximadamente 35 años, por lo que extrapolando esta tendencia se llegaría a 50000 millones en poco más de un siglo. Aunque la capacidad de la Tierra no parece estar teóricamente limitada a valores de ese orden si se aceptan niveles muy altos de tecnología (cf. C. Marchetti, On 10^{12} : A check on Earth carrying capacity for man, IIASA Report RR-78-7, 1978), todas las hipótesis suponen que esta tendencia variará y que en un plazo de aproximadamente un siglo la población se habrá estabilizado o, en las suposiciones más pesimistas, habrá disminuido sen-

siblemente. Esto ocurriría como consecuencia del establecimiento de medidas de control premeditadas o también espontáneamente, a través de hambrunas generalizadas y de conflictos bélicos.

Dejando de lado los extremos, las hipótesis estabilizadoras mínimas llegan a una población final del orden de 7000 millones de habitantes, y las más optimistas aceptan que la humanidad conseguirá sortear obstáculos y se estabilizará en una cifra próxima a los 20000 millones. Este valor ya es, de todos modos, menos de la mitad de la población extrapolada a un siglo para la tendencia actual.

En lo que sigue, voy a tomar un valor intermedio entre los valores de mínima y de máxima para usarlo como hipótesis de trabajo y tener un marco de referencia en nuestras estimaciones. Acepto, pues, una población estabilizada de 15000 millones de habitantes como valor asintótico para la humanidad.

Consideremos ahora la energía. Como vimos antes, hay sociedades que viven prácticamente a nivel de subsistencia y otras que consumen energía a 300 veces ese nivel. Esta situación, unida a las expectativas que comentamos anteriormente, es explosiva. Algunos estudiosos del tema (cf. R.L. Heilbroner, *An inquiry into the human prospect*, W.W. Norton and Co., N.Y., 1980), consideran que las llamadas "guerras de distribución" son inevitables en las próximas décadas. Ocurran o no éstas, suponemos nuevamente que la situación se supera y que se alcanza finalmente una sociedad estabilizada con un consumo también estabilizado, es decir, con una cuota energética individual promedio constante.

¿Cuál debería ser esa cuota? Aquí también se hacen múltiples hipótesis, desde el extremo de preconizar una vuelta total a la vida natural hasta el de imaginar una sociedad con un consumo individual muchas veces superior al máximo actual. También para fijar ideas, vamos a hacer tres suposiciones, a saber: i) que la cuota asintótica sea similar a la de Europa Occidental hoy día, con lo que el consumo mundial para nuestra hipótesis de 15000 millones de habitantes sería de 8 veces el actual; ii) que sea la actual de Estados Unidos, para lo cual el factor resultante es 20; iii) que duplique ésta, con factor 40 para el consumo total.

El significado y la justificación de las dos primeras hipótesis son claros; la tercera requiere explicación. Según algunas opiniones (cf. A.M. Weinberg y R.P. Hammond, 4ta. Conf. Int. Usos Pacíficos de Energ. Atómica, Informe 49/P/033, Ginebra, 1971), una civilización de más de 10-12000 millones de integrantes sólo es viable si el consumo individual se incrementa 2 ó 3 veces respecto del máximo actual del mundo. La razón debe buscarse en la aparición de

nuevas necesidades colectivas que ahora carecen de significación pero serían muy importantes en una sociedad de ese tamaño, como la potabilización de agua de mar, el control de las contaminaciones química y térmica, y otras, todo lo cual incrementaría los requerimientos energéticos sin modificar sensiblemente la calidad de vida respecto de la segunda hipótesis.

Para expresar estos consumos con comodidad, sin recurrir continuamente a números muy grandes, voy a usar la unidad Q, introducida por Putnam (cf. P.C. Putman, *Energy in the future*, Van Nostrand, N.Y., 1953) y que se ha hecho muy popular últimamente. Su valor es 10^{18} Btu, o sea aproximadamente 10^{21} Joule. Esto es lo que se consume actualmente, en términos de la energía primaria térmica equivalente a todas las formas usadas, en unos 4 años, de modo que los consumos asintóticos recién postulados, con factores de multiplicación 8 a 40 respecto del actual, cubren un rango de 2 a 10 Q/año.

Limitaciones.

A continuación vamos a dar dos ejemplos de limitaciones intrínsecamente asociadas con la utilización de un recurso energético particular.

En el caso de los recursos finitos, una limitación de su uso está dada por su disponibilidad. La curva que caracteriza el empleo de este tipo de recursos se da en la figura 2, en que las ordenadas corresponden al consumo anual y las abscisas al tiempo. La magnitud total del recurso es la integral de la curva y, a todo fin práctico, depende esencialmente de la unidad de la escala de las abscisas. Por ejemplo, el caso ilustrado en la figura 2 corresponde al petróleo alrededor de 1970 (cf. M. King Hubbert, *Outlook for fuel reserves*, Encyclopedia of Energy, McGraw-Hill, N.Y., 1976); el intervalo marcado "80 %" en la figura es de aproximadamente 60 años.

El mismo esquema es válido para el carbón, pero en ese caso el límite entre lo ya consumido y las reservas estaría muy corrido hacia la izquierda a la fecha actual y cubriría sólo una pequeña fracción de la superficie delimitada por la curva y el eje de las abscisas; en cuanto al ámbito del 80 %, abarcaría varios siglos. Se ve, entonces, que hay recursos finitos de muy diversa magnitud, pero que para cualquiera de ellos la curva es acampanada, por lo que el consumo crece, llega a un máximo y luego va cayendo, y tiene integral finita, por lo que tarde o temprano el recurso se agota.

Otro tipo de limitación es la ecológica. En el caso de los combustibles fósiles, por ejemplo, existe la preocupación de que la acumulación de anhídrido carbónico en la atmósfera debida a la utilización masiva de estos com-

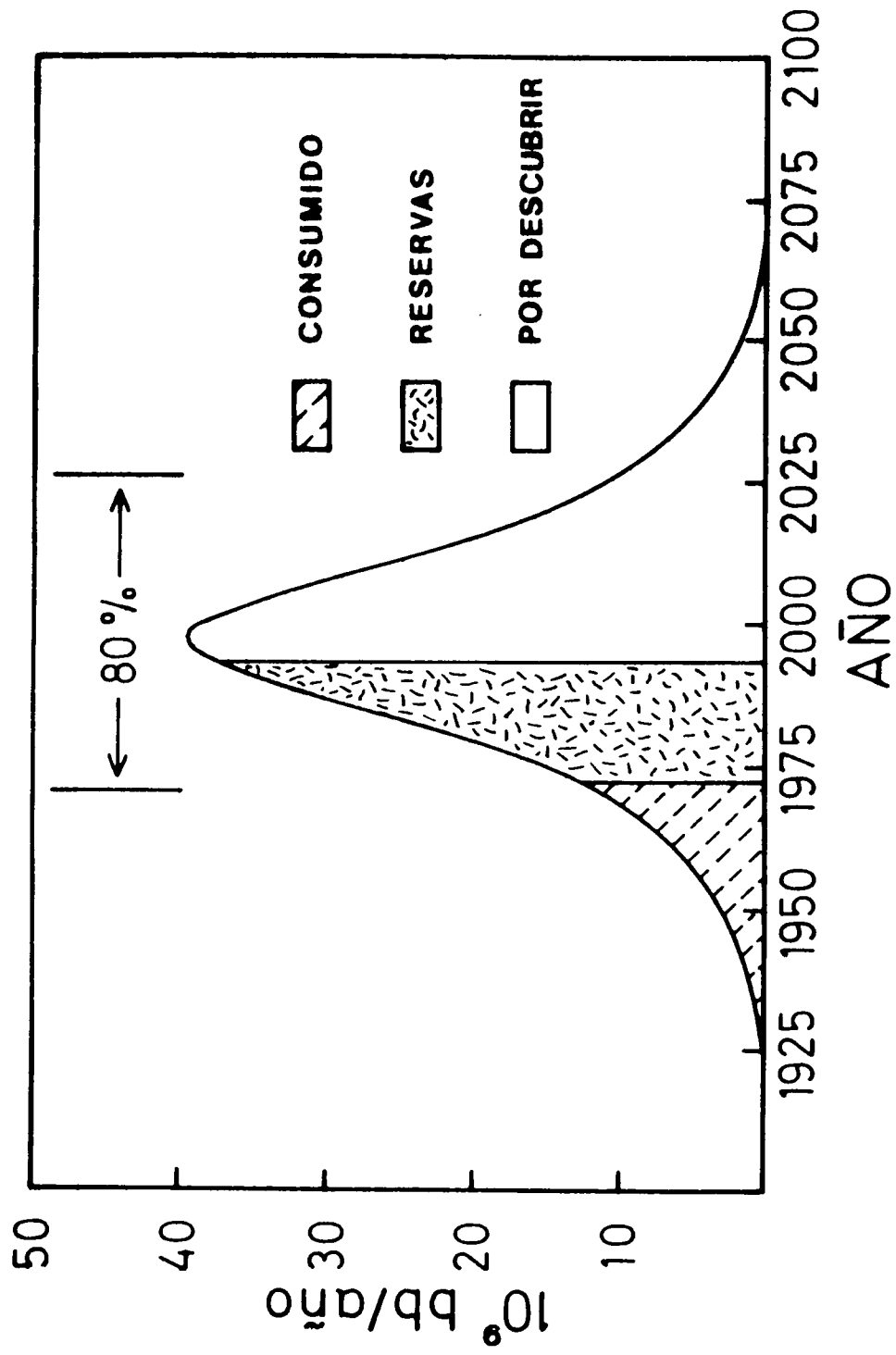


Fig. 2. Ejemplo de recurso finito.

bustibles está provocando un aumento de la temperatura de la superficie terrestre. La situación no está en manera alguna clara todavía y se estudia intensamente, pero la discusión que sigue, tomada de un trabajo publicado hace unos años (L.Machta y K.Telegadas, Inadvertent large-scale weather modification, en W.N.Hess, Ed., Weather and Climate Modification, Wiley, N.Y., 1974), es interesante para dar una idea de las características del problema.

Según estos autores, la capacidad estimada para los distintos reservorios de carbón del planeta sería de $0,6 \times 10^{12}$ toneladas de carbón (tC) para la atmósfera, de $1,1 \times 10^{12}$ tC para las capas superiores del océano y de 30×10^{12} para el océano profundo, que es el reservorio final del carbono. A su vez, las velocidades de transferencia son de 2×10^9 tC/año para el pasaje de la atmósfera al océano superior y de $0,1 \times 10^9$ tC/año para el pasaje desde éste a las capas más profundas. Estos valores pueden ubicarse en perspectiva teniendo en cuenta que la inyección actual a la atmósfera debida al uso de combustibles fósiles es del orden de 10^{10} tC/año. Se ve entonces que, aunque esta cantidad sea relativamente pequeña respecto de la capacidad del océano, no lo es en relación con la velocidad de transferencia, por lo que el CO_2 se irá acumulando en la atmósfera. Se comprende también que esta acumulación será tanto más rápida cuanto más elevado sea el consumo de combustibles fósiles.

No cabe duda que la acumulación de CO_2 por encima de cierto nivel podría tener consecuencias catastróficas, ya que bastarían pocos grados de aumento de la temperatura media de la atmósfera para que se fundiera el hielo de la Antártida y de Groenlandia y el nivel del mar se elevara en varias decenas de metros. Sin embargo, es materia de debate cuál es ese nivel y, por lo tanto, la urgencia de establecer limitaciones respecto del uso de combustibles fósiles por esa causa (cf. J.Williams, Ed., Carbon Dioxide, Climate and Society, Pergamon Press, Oxford, 1978). Pero queda claro del debate que, aun cuando un recurso finito tenga magnitud suficiente para ser utilizado durante un período muy largo, su uso puede verse limitado por razones independientes de su abundancia.

Estos son sólo algunos ejemplos del tipo de limitaciones asociadas con el uso de un recurso. Otros factores importantes son la seguridad del suministro, la facilidad o dificultad de obtención y, en general, todos los aspectos en que su utilización interactúa de alguna manera con la sociedad. El creciente conocimiento de este tipo de cuestiones es lo que hace cada vez más necesario que esta interacción se encare en forma integral y no limitándose a la interfase económica, como es tradicional hacerlo.

Opciones.

La situación asintótica recién expuesta se caracteriza porque el requerimiento anual es constante y mucho mayor que el actual. Vamos a examinar ahora las posibilidades que presentan las fuentes conocidas para satisfacerlo.

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 (esta parte del consumo de energía primaria incluye los combustibles empleados para producir electricidad y el equivalente térmico de la que se genera directamente como tal, por ejemplo, la de origen hidráulico). La primera de estas necesidades se cubre casi exclusivamente por medio del petróleo y del gas natural, cuya característica esencial a ese respecto es que son transportables. Si se dispusiese solamente de instalaciones fijas productoras de electricidad (la llamada "economía totalmente eléctrica") o de electricidad y calor (reactores nucleares de alta temperatura), para cubrir los usos recién mencionados sería necesario sintetizar "in situ" combustibles transportables. 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 en que predominarían combustibles líquidos y gaseosos sintéticos obtenidos por hidrogenación del carbón.

Es claro entonces que cualquier fuente energética puede, en principio, 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 2, para la cual se han tomado principalmente los valores aceptados por la Conferencia Mundial de la Energía (cf. World energy resources 1985-2020, Conservation Commission of the World Energy Conference, IPC Scientific and Technical Press, Guilford, UK, 1978), se da una estimación del potencial energético del mundo.

En primer lugar, se observa que el carbón es el combustible fósil más abundante. La cifra dada ha sido muy filtrada en los últimos años en reuniones de expertos y puede considerarse como representativa del estado actual del conocimiento, aunque no cuenta con acuerdo unánime y hay opiniones aisladas, pero caracterizadas, que la colocan muy por debajo (cf. G.B. Fettweiss, Coal is not so abundant, First IIASA Conference on Energy Resources, IIASA Report CP-76-4, Laxenburg, Austria, 1975). En principio, por lo tanto, la posibilidad de se-

Tabla 2

RECURSOS ENERGETICOS MUNDIALES

(En unidades Q. 1 Q $\approx 10^{21}$ 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.

guir usando combustibles fósiles por un período prolongado existe, ya sea empleando directamente el carbón o sintetizando hidrocarburos a partir de él. Sin embargo, como vimos antes, el consumo puede verse limitado por razones ecológicas cuando quede aún mucho carbón por utilizar.

En relación con los combustibles fósiles, es importante recalcar nuevamente que, a pesar de la agudeza con que el problema de su suministro se plantea actualmente, su verdadera dimensión se ubica más adecuadamente si el panorama se observa en términos más amplios que el pasado y el futuro inmediatos. En la figura 3, por ejemplo, cuya abscisa cubre una escala de varios miles de años, se aprecia el significado relativo que los combustibles fósiles tienen para la humanidad en esa perspectiva. Evidentemente, si ésta se concibe como algo más que un mero fenómeno pasajero en la superficie del planeta, surge con claridad que el problema actual de los combustibles fósiles es una cuestión circunstancial que caracteriza una etapa de la evolución pero que no tiene el carácter crucial que muchas veces se le adjudica.

La segunda fuente no renovable es la nuclear, para la cual existen diversas variantes. Como sabemos, hasta ahora se está utilizando exclusivamente la fisión térmica, que es una manera muy rudimentaria de usar el uranio en la cual sólo se aprovecha aproximadamente el 1 %. Para esta utilización, el recurso es pequeño; las reservas conocidas actualmente en el mundo son de 1 Q y los recursos de 2 Q. Eso no le quita importancia en el futuro inmediato, porque por ahora se está utilizando para producir solamente una pequeña proporción de la energía eléctrica y ésta, a su vez, es la cuarta parte de la energía primaria consumida, pero en esta forma carece de significación a largo plazo.

En el caso de la fisión, la situación cambia radicalmente cuando se aplican 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 que emplea neutrones rápidos y pasa por plutonio, pero 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 fisible, el uranio-233.

Con la fisión reproductora, los minerales de uranio de yacimientos con costos de hasta 130 dólares por kilogramo de concentrado que se utilizan actualmente multiplican su potencial por un factor 140-150 al ser mejor aprovechados y al añadirse el torio como recurso para leyes similares. Pero la cuestión no se agota ahí, porque con esta tecnología se alcanza un uso tan eficiente de los

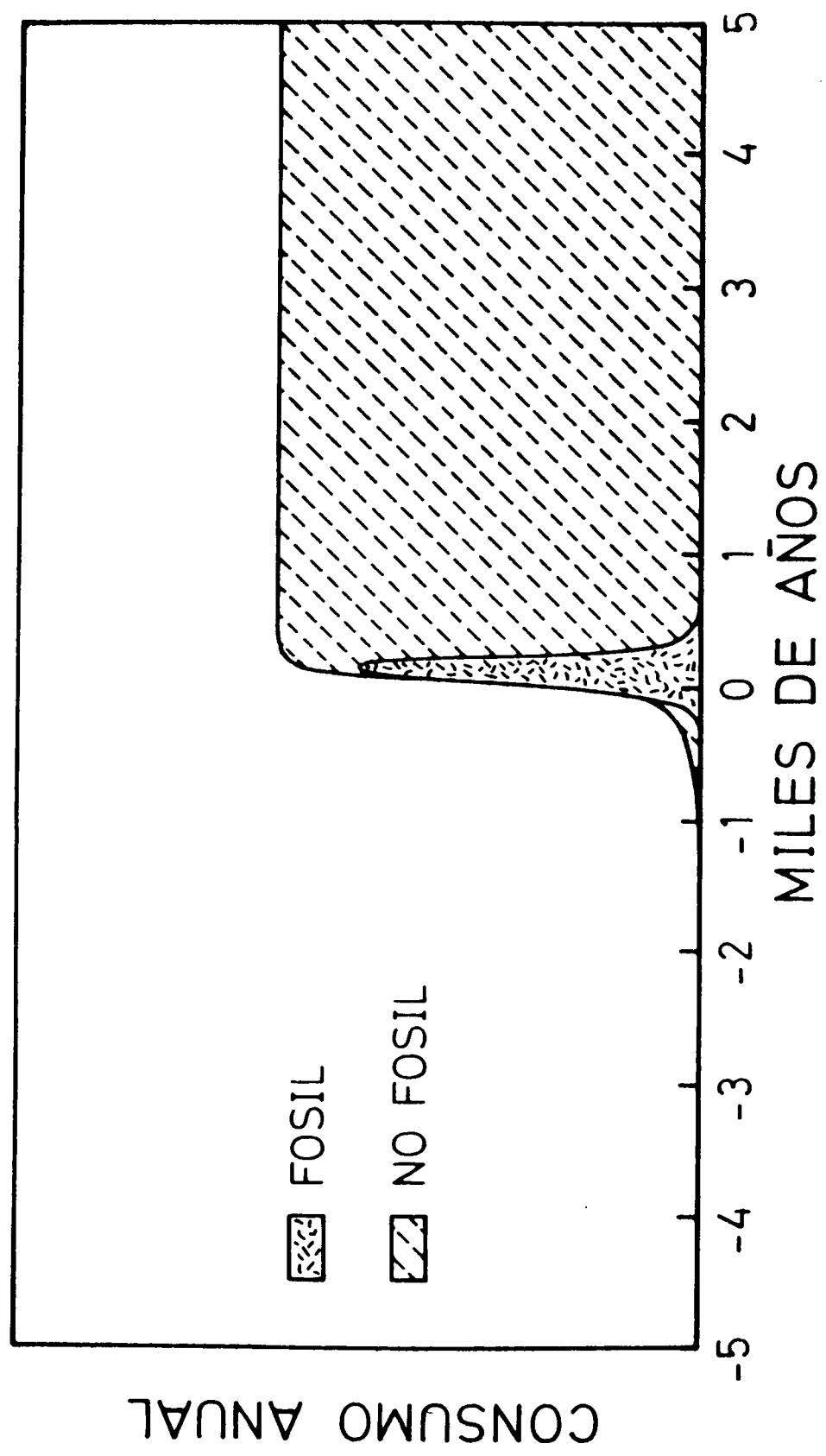


Fig. 3. Los combustibles fósiles en la evolución humana.

combustibles nucleares que, además de los minerales de concentración suficiente para que el costo de extracción sea menor de 130 dólares por kg es posible beneficiar económicamente fuentes mucho más diluidas, inclusive muchas rocas ígneas que contienen uranio y torio como trazas, a nivel de aproximadamente 10 partes por millón, y el agua de mar, en que se encuentran disueltos a concentraciones 100 o 1000 veces menores. Esto se comprende fácilmente, ya que con el costo actual de 130 dólares por kg se puede generar electricidad competitivamente empleando la fisión térmica y, por lo tanto, empleando la fisión reproductora se podrá pagar mucho más caro el combustible. En estas condiciones, la revalorización de las fuentes diluidas aumenta enormemente el recurso. Tomando 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 infinito.

Lo mismo ocurre con la fusión, aunque aquí la primera alternativa es de mayor magnitud. Para la fusión deuterio-tritio, que será probablemente la primera que se utilice, el factor limitante es que el tritio no existe prácticamente en la naturaleza y debe obtenerse artificialmente, para lo cual se emplea litio. 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 emplea solamente el 1 % del litio 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 del recurso justifica los esfuerzos que se realizan para que la fusión sea una realidad como fuente energética. 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.

En el caso de la energía geotérmica, hay también dos posibilidades de magnitudes muy diferentes. Las fuentes explotables con las tecnologías actuales son de poca significación y están constituidas por el vapor y el agua recolectados en reservorios naturales apropiados (vapor y agua "fósiles"). En cambio, el recurso se agranda mucho si se consideran nuevas tecnologías que se encuentran en estudio y que pretenden extraer calor de rocas secas calientes produciendo una fragmentación subterránea en el fondo de una perforación e inyectando agua por ésta de modo que se caliente y sea recuperable como vapor. Se trata, pues, de realizar un yacimiento geotérmico artificial. La razón del gran potencial es que la corteza es muy grande y, por lo tanto, la cantidad

de calor involucrada también, pero es dudoso que pueda llegarse a valores del orden del dado en la Tabla por los posibles problemas de estabilidad de la corteza que podrían originarse a ese nivel de utilización.

Los aprovechamientos recién mencionados corresponden al empleo de las fuentes geotérmicas como no renovables. En cada caso particular, la capacidad de recarga estará dada por la posibilidad de que el calor y el agua lleguen nuevamente al lugar del yacimiento para renovarlo, lo que dependerá de las condiciones geológicas en que éste se encuentre. Como recurso puramente renovable, la geotermia es poco significativa. Su potencial debería medirse en este caso por el flujo geotérmico normal de la Tierra y éste es muy bajo, del orden de 0,01 Q/año para toda la superficie de los continentes.

La generación de electricidad por medios hidráulicos es muy importante actualmente, pero 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.

En lo que respecta al caso solar, el empleo de la radiación solar directa presenta una situación particularmente interesante, 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. Su utilización plantea, además, un problema geopolítico similar al actual del petróleo, ya que las zonas de gran potencial pertenecen a países que se encuentran próximos al Ecuador y que disponen de grandes extensiones desérticas. Es evidente que el tipo de cuestiones que pueden aparecer si, por ejemplo, se fabrica hidrógeno con energía solar en el Sahara para ser transportado a países desarrollados poco asoleados no serán muy diferentes de las que se plantean hoy día en relación con el Golfo Pérsico, salvo que se produzcan grandes cambios en las estructuras políticas mundiales.

La energía eólica, que es una forma indirecta de la energía solar, aparece también como una posibilidad importante, como se ve en la Tabla. La potencia obtenible es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento, por lo que su utilización resulta particularmente apropiada en las regiones de la Tierra de vientos intensos. Otra utilización indirecta es la bioenergía que, en forma de leña, fue una de las primeras fuentes empleadas por el hombre.

La posibilidad de su empleo sistemático en gran escala plantea el problema de que la energía total involucrada en la fotosíntesis no es muy grande y, además, de que ésta tiene un rendimiento de aprovechamiento solar muy bajo cuando éste se mide, como debe medirse para ese fin, por la relación entre la energía fijada en el vegetal y la que incidió en el mismo lapso en la superficie de terreno que éste ocupa. Este rendimiento es del orden del 0,2-0,3 % y sólo para algunas plantas particulares se acerca al 1 %, 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 las plantas 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 se ve que su potencial es significativo. Esto no ocurre con las olas y las mareas, que son de origen esencialmente gravitatorio y que 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 comparativamente los datos de la Tabla 2 se ve que la energía nuclear y la energía solar son las únicas fuentes realmente significativas para el futuro de la humanidad en lo que respecta a sus dimensiones. Es claro entonces que su estudio y manejo debe tener una prioridad por lo menos similar a la que se asigna usualmente a las fuentes de utilización más inmediata o las destinadas a cubrir el paso intermedio entre el estado actual y el horizonte asintótico, como la utilización racional del carbón por liquefacción y gasificación, la explotación a pleno de la energía hidráulica, y otras.

La situación argentina.

¿Qué características le corresponden a la Argentina en el panorama recién expuesto? Si suponemos que los 15000 millones de habitantes se distribuyen en

la superficie habitable de la Tierra uniformemente, esta región de Sudamérica queda poblada con algo más de 300 millones de habitantes. Sin embargo, no es imposible que este número sea mayor, ya que el clima, la productividad de la tierra y las posibilidades de estándar de vida alto hacen que la región sea particularmente apta, comparada con muchas otras, para alojar seres humanos. Nosotros, los argentinos, aparentemente no hemos sabido aprovecharla plenamente hasta ahora por razones que los sociólogos, los políticos e inclusive los psicólogos analizan y discuten, pero eso no quiere decir que la humanidad en su conjunto no pueda hacerlo. De manera que la posibilidad de que la Argentina tenga una población del orden de los 300 millones de habitantes no es absurda. Como, para los escenarios mundiales de 2 a 10 Q/año mencionados más arriba, el consumo resultante para el país con esa población sería de 20 a 100 veces mayor que el actual, es obvia la conveniencia de tratar de desarrollar su potencial energético con la anticipación suficiente para que el pasaje al mundo asintótico se cumpla sin transiciones desagradables.

Las bases para ello están comenzando a darse en el país, aunque son todavía muy incipientes y no del todo orgánicas. En el campo de la energía nuclear, la Argentina tiene ya un programa lanzado. Se está comenzando a trabajar también en el desarrollo de varias energías no convencionales, respecto de lo cual pueden anotarse algunas conclusiones de interés. En primer término, es probable que el recurso eólico pueda emplearse en plazos relativamente breves, dado el avance que su tecnología de utilización muestra en el mundo y las condiciones particularmente ventajosas que reinan al respecto en la Patagonia. A un plazo algo mayor, sería posible la aplicación masiva de la energía solar, que ya se utiliza actualmente en algunas instalaciones descentralizadas. Se están evaluando, asimismo, las posibilidades de algunos lugares del país respecto de la generación geotérmica. En cuanto a las mareas, aunque sean poco significativas a nivel mundial, no lo son en el caso de la costa atlántica austral, en la cual se encuentran varios de los escasos 20 o 25 lugares del mundo que se consideran apropiados para instalar centrales mareomotrices. Por otra parte, la gran extensión de tierras fértiles existente en el país hace que se den también condiciones favorables para la producción de bioenergía, de lo cual los experimentos de sustitución de hidrocarburos por alcohol de fermentación en el transporte automotor tucumano son un primer ejemplo.

Estas condiciones de contorno, junto con la intensificación del uso de las fuentes convencionales clásicas, dan al país la posibilidad de enfrentar el desafío de su desarrollo mediante una política energética racional y co-

herente. En el futuro inmediato, el aspecto central de esa política debe ser el aumento sustancial del consumo per caput. Esto no significa dejar de lado el mejoramiento de la eficiencia de utilización, que contribuirá sin duda a disminuir el valor absoluto de la meta y hacerla más rápidamente accesible, sino reconocer el hecho objetivo de que, para nuestros estándares energéticos actuales, el acceso a cuotas individuales mayores es prioritario.

El marco energético a largo plazo recién visto, caracterizado porque la energía solar en sus diversas manifestaciones y las formas avanzadas de la energía nuclear son las fuentes dominantes, fija las líneas estratégicas que, en interacción con las posibilidades tácticas y compatibilizadas con ellas, deberán decidir en todo momento las medidas inmediatas más convenientes. El éxito de esta interacción exige evaluaciones detalladas y depende, en última instancia, de que el país sea capaz de organizar y mantener una actividad continua y permanente de análisis y evaluación del máximo nivel técnico, de modo de tener la posibilidad real de ir ajustando, con fundamentos ciertos, los programas a los progresos de las tecnologías y de efectuar cambios racionales de énfasis en función de las modificaciones de detalle en el panorama estratégico que resulten de esos progresos.