

**“Aspectos Medioambientales del Desarrollo
Energético”**

LEÓN GARZÓN RUIPÉREZ

**Catedrático Emérito de la Escuela Superior de
Ingenieros de Minas de Oviedo.**

RESUMEN:

Con las incertidumbres que comporta la adopción razonada de un escenario energético que permita mantener sin riesgos indebidos un crecimiento sostenido, en la presente ponencia se trata de justificar que el más idóneo, aunque con las restricciones que oportunamente se darán, es el que pasa por la mayor utilización del uranio en los reactores de fisión, para llegar antes de mediados del próximo siglo al empleo, prácticamente único, de la energía de fusión.

Como cuestión previa al desarrollo de esta ponencia desearía señalar que voy a dar más importancia a las cuestiones de fondo que a los detalles técnicos.

1. INTRODUCCIÓN.

Aunque los términos que configuran esta ponencia vienen siendo muy utilizados en diversas publicaciones y por los medios de comunicación, ello no impide que intentemos reflexionar sobre su alcance y significado, sobre todo en el desarrollo energético, que, a nuestro juicio es el término que reviste mayor interés. El término medio-ambiental se viene utilizando desde hace pocas décadas, quizá debido a que las escalas espaciales (y por tanto las temporales), se han ido reduciendo. La visión global de nuestro planeta desde la Luna o desde naves espaciales tripuladas, el llamado planeta azul, es muy reciente. Visto desde fuera, aunque haya sido por unos pocos, supone un cambio importante en la manera de ver el mundo, algo parecido a lo que pudo significar el descubrimiento de otras tierras por Colón y la asunción de la esfericidad de la roca que nos soporta. Las comunicaciones han contribuido a fundir escenarios parciales en otro más general, que abarca al planeta globalmente. Esta globalidad afecta sobre todo a la atmósfera, y en particular, a los primeros kilómetros, según veremos más adelante. La circulación general de la atmósfera, cuyo motor es el calentamiento solar, ilustra dicha globalidad. El llamado efecto mariposa dramatiza ese carácter unitario.

El medio hídrico, aunque representa un porcentaje muy elevado de la superficie terrestre, no posee el carácter global del medio gaseoso, pues las corrientes de agua son, en razón de la mayor densidad, menos intensas y más locales, que las de aire. Finalmente, el medio terrestre es el que posee la menor movilidad.

Con todo ello quiero significar que el término medio ambiente, a menos que sea el atmosférico, suele ser local.

El desarrollo energético debe contemplarse, a nuestro juicio, como una característica, muy importante, ligada al desarrollo de las sociedades, o si se prefiere, a la evolución. Antes de que Darwin escribiera el Origen de las especies, se creía que el Universo era un sistema estático. No se contemplaba el hecho de que todas las cosas procedieran de un ancestro determinado.

La hipótesis de Prout, revalidada con el descubrimiento de los isótopos, junto con la tabla de los elementos, representan, a nuestro juicio, la expresión de la evolución de la materia desde un ancestro común: el átomo de hidrógeno.

Los avances en el conocimiento de la estructura de la materia, y el modelo del Big-Bang, han hecho retroceder ese ancestro hasta los quarks. La evolución del Universo, desde una sopa de quarks y otras partículas, hasta ahora, es una consecuencia de la existencia de fuerzas, a las que corresponden otras tantas energías. Las fuerzas son, en orden creciente de intensidad, la gravitatoria, electrodébil, electromagnética y nuclear (o fuerte). A cada una de éstas le corresponde la correspondiente energía.

El desarrollo energético debe ser contemplado como un aspecto muy importante, según veremos, de la evolución del homo-sapiens, que como es sabido se adentra algunos millones de años en nuestro pasado, cuando, por causas que no vienen aquí al caso una rama de los primates se lanza a las praderas y en 1,5 millones consigue que su masa cerebral se multiplique por tres, con respecto a sus parientes más próximos.

En los procesos evolutivos, sean cuales fueren, existen momentos cruciales o estelares. La evolución de la especie humana, no fue una excepción, pudiéndose considerar el descubrimiento del fuego, como uno de esos momentos, pues representa, sin duda, el primer paso en la utilización de una fuente de energía (recurso energético).

El índice del consumo per cápita se mantuvo en niveles muy bajos y relativamente estables hasta el siglo XIX. Aparte de la energía necesaria para el metabolismo, 1 ó 2 miles de kilocalorías, la cual la proporcionan los alimentos, se utilizaban combustibles para usos culinarios y de calefacción y muy rudimentariamente en la producción de metales y en la artesanía. Se incorporaron sistemas más evolucionados de aprovechamiento de la energía del viento y del agua en forma de molinos y ruedas elevadoras, pero todo ello a escala muy limitada.

El consumo de energía per cápita muestra claramente el proceso evolutivo de la humanidad, en base al cual se pueden establecer una serie de etapas que son la del hombre primitivo (hace 10^6 años), cazador (hace 10^5 años), agricultor

primitivo (hace $7 \cdot 10^4$ años), agricultor avanzado (hace 600 años), industrial (hace 125 años) y tecnológico (actual).

A lo largo de esas etapas se produce un salto importante, en la del agricultor avanzado y otro mayor en la primera revolución industrial, caracterizada por la utilización del vapor de agua como fluido de trabajo en las máquinas térmicas, y el carbón como fuente de energía.

Observando la evolución de la población y la del consumo mundial de energía se puede advertir que existe un cierto paralelismo entre las correspondientes curvas representativas. Se puede comprobar, en efecto, que se satisface bastante bien la relación:

$$E = 3,7 \cdot 10^{-6} P^{2.532}$$

siendo E el consumo de energía en Tep y P la población en 10^6 . El coeficiente de correlación es de 0,9438.

$$\frac{d E}{d t} = a t^{\frac{3}{2}}$$

La ley empírica anterior equivale a esta otra:

es decir, la velocidad de crecimiento de la producción de energía es proporcional a la potencia 1,5 del tiempo.

En cualquier caso el hecho más relevante es, por una parte, el crecimiento de la población, y, por otra, el todavía mayor crecimiento del consumo de energía. Así, los ritmos de crecimiento alcanzan un máximo entre 1950-1990, con una variación media anual que es 4,9 veces superior a la correspondiente al período histórico 1650-1750.

Si deseáramos interpretar la relación anterior, que se ha mantenido a lo largo de más de tres siglos, podríamos atribuirle a una especie de Darwinismo. La mayor disponibilidad de energía aumentaría la calidad de vida, por lo tanto también la esperanza de vida, y con ello el aumento de la población. Si esto fuera así, podría pensarse que las políticas de ordenación y perfeccionamiento de los sistemas de oferta y el consumo de energía apenas tendrían efectos significativos, a medio plazo, en la evolución que hemos señalado.

Una cuestión que surge al considerar esa evolución es la de si la ley empírica encontrada seguirá presidiéndola o sí, por el contrario, se alcanzará un límite.

Hasta ahora el crecimiento ha sido exponencial y cabe considerar que para el sistema que venimos considerando, por tener un soporte finito, y por ser también finitas las reservas de energía, no pueda mantenerse indefinidamente, sino que experimenta una inflexión, en cuyo caso la variación exponencial dejaría paso a una variación de tipo sigmoide.

Aparte de la disminución de las reservas energéticas existen otros factores que al actuar sobre el sistema pueden frenar, o incluso detener, su crecimiento.

Uno de estos factores es el medio-ambiente, un término que ha comenzado a utilizarse hace aproximadamente 4 décadas y al que nos referimos anteriormente.

2. LOS ASPECTOS MEDIO-AMBIENTALES DE LA ENERGÍA.

A título informativo señalaremos que el valor medio de las previsiones de energía para el horizonte del año 2010 es de 16,7 TW, que equivalen a un consumo anual de $1,88 \cdot 10^{12}$ Tec.

Esas necesidades se cubrirán con las energías fósiles (carbón, petróleo, gas), la energía hidroeléctrica y la nuclear. Las energías solar, eólica y la biomasa representarán, probablemente, contribuciones poco significativas.

Cada tipo de energía posee un índice de mérito, el cual se toma como la entropía por unidad de energía. Recuérdese que en la transformación de un sistema a P y T constantes el máximo trabajo realizable viene dado por la ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Así pues, cuanto menor sea ΔS tanto mayor será ΔG , esto es, el trabajo máximo.

Los mayores índices de mérito corresponden a la energía gravitacional, seguida por la nuclear. Por esta razón la energía hidroeléctrica que convierte la energía gravitacional del agua en electricidad puede alcanzar un rendimiento cercano al 100%, muy por encima de los rendimientos de las energías químicas o nucleares.

Resumiendo lo anterior, señalaremos que la producción de energía por un sistema comporta un incremento de desorden (o caos) en el ambiente que lo rodea. La creación de energía supondría un aumento de orden en el sistema, esto es, una disminución de entropía, circunstancia que iría en contra del principio

general de aumento de esta magnitud, sino fuera porque el aumento en el ambiente hace que el balance total sea positivo, es decir, tiene lugar un crecimiento neto de entropía.

Hasta ahora la demanda energética se cubre con energías fósiles, en un 90%, y con energías renovables en un 10%, siendo la más importante de éstas la hidroelectricidad. Aproximadamente el total se distribuye en tres partes prácticamente iguales: industria, transporte y usos domésticos. Dentro de la década de los 60 se introdujo el uranio como un combustible más, siendo la contribución actual mundial de un 10%. Sin tener en cuenta las reservas existentes, que desde luego son, hoy por hoy, finitas, cabe recordar que las más importantes de ellas corresponden al carbón y el uranio, sobre todo si la penetración de los RRR en el parque de producción de electricidad se produce pronto y a un ritmo adecuado.

Sin embargo, el problema que se alza sobre la humanidad no viene por el lado del agotamiento de las reservas energéticas, sino por el hecho de los deterioros que los sistemas de producción ejercen sobre el medio ambiente, los cuales son de naturaleza diversa, dependiendo del tipo de sistema de producción de energía, y del carácter local o general del impacto producido. Aunque los impactos locales puedan ser molestos, o incluso peligrosos dentro del área afectada, no son los que pueden llegar a comprometer un desarrollo sostenido ni a provocar una catástrofe planetaria. Por esta razón, los consideraremos únicamente a título informativo.

Dejaremos aparte los aspectos medio ambientales de la hidroelectricidad, pues, según señalábamos anteriormente, este tipo de sistemas "gravitacionales" posee claras ventajas sobre los demás. Los sistemas termoeléctricos utilizan los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) o el uranio en las centrales térmicas convencionales o nucleares respectivamente. La energía, en el primer caso, se obtiene mediante su combustión con el O_2 del aire. En el segundo caso es una combustión sin oxígeno: es la fisión nuclear.

El carbón y el petróleo, y en mucha menor medida el gas, contienen tal variedad de sustancias que bien podría decirse gráficamente recuerdan el Beilstein. Esto es, claro está, una exageración, pero si se consideran los elementos traza ya no lo sería tanto. En cualquier caso, con ello quiero significar que en la combustión se formará una abigarrada diversidad de compuestos, sólidos y gaseosos. Los primeros, gracias a los modernos sistemas de precipitación, quedan retenidos en porcentajes del 99,5%, el resto es emitido a la atmósfera, denominándose materia particulada. A pesar del elevado rendimiento de los sistemas mencionados, las emisiones son importantes debido al hecho de las enormes tasas de consumo del combustible. Como orientación bastará señalar que una central

térmica de carbón de una potencia eléctrica de 1000 MWe, consume diariamente unas 12.000 Tm de carbón térmico, lo que comporta una emisión de partículas de unas 15 Tm/día. Para una central de petróleo la cifra se reduce en un factor de 6 y para una de gas en uno de 100.

Entre los elementos sólidos emitidos se encuentran el uranio y el torio junto con los descendientes de las series radiactivas correspondientes, algunos de los cuales poseen grandes riesgos radiológicos cuando son inhalados.

En una serie de trabajos realizados en el laboratorio de Energía nuclear de la Escuela de Minas de la Universidad de Oviedo, quedó demostrado que, en operación normal, y a igualdad de potencia, una central térmica de carbón posee un impacto radiológico que es significativamente superior al de una CN de agua a presión y del mismo orden que el de una CN de agua a ebullición.

Con todo, en dichos trabajos señalábamos que, tanto para unas como para otras, el impacto radiológico es una pequeña fracción del debido a la contribución del fondo natural por parte del radón y sus descendientes de vida corta.

Las sustancias gaseosas emitidas por las centrales son muy diversas, aunque menores en número que las inicialmente presentes en el combustible.

Una vez emitidas, se dispersan y reaccionan, originando otras que pueden ser nocivas para la salud. Esas reacciones suelen ser muy complejas, debido a que además de las moléculas reaccionantes, intervienen otros agentes energéticos como la luz ultravioleta y las radiaciones ionizantes, las cuales pueden facilitar y/o modificar el curso de determinadas reacciones. La mayor facilidad se debe al hecho de que las reacciones entre átomos excitados y/o iones no poseen energía de activación, siendo por ello mucho más rápidas que las mismas reacciones entre moléculas. Otro factor favorable para las reacciones es el efecto catalítico y/o del tercer cuerpo que ejercen las partículas.

Unos y otras se dispersan en el seno de la atmósfera siguiendo un comportamiento que puede razonablemente describirse utilizando modelos dispersivos, uno de los más utilizados es el Gaussiano, en el cual la concentración de un contaminante en masa/m³ en (0,y,0) viene dado por la expresión:

$$\chi_{(0,y,0)} = \frac{Q}{\pi\sigma_z\sigma_y v} \cdot \exp\left[-\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right]$$

siendo:

Q = la tasa de emisión en masa/s.

σ_z, σ_y = desviaciones estándar de la concentración en las direcciones señaladas por los subíndices.

H = altura efectiva de descarga sobre el suelo en m.
 y = distancia medida sobre la dirección del viento (m).
 z = distancia vertical medida desde el origen (m).
 v = velocidad del viento en m/s.

Utilizando las relaciones de Sutton se encuentra:

$$\chi_{max} = \frac{2 Q}{e \pi v H^2}$$

es decir la máxima concentración de un contaminante a nivel del suelo varía según la relación anterior, la cual muestra que a igualdad de las demás características, dicha concentración (o inmisión) es inversamente proporcional a H^2 ; de aquí la conveniencia de utilizar chimeneas de gran altura, lo que se traduce en que la contaminación por gases debida a una determinada central, posee un ámbito de influencia mayor que el local, trascendiendo incluso las fronteras de los países (mesoescala). Es precisamente lo que ocurre con la llamada lluvia ácida, que, como es conocido, es un proceso atmosférico de producción de ácido sulfúrico que recuerda el método industrial de obtención de dicha sustancia, que parte también del SO_2 . La oxidación de este gas puede realizarla el oxígeno del aire y con mayor eficiencia los NO_x , que también se encuentran en los gases emitidos por las centrales térmicas y más especialmente en las emisiones de los motores de explosión, pues la reacción entre el N_2 y el O_2 para formar los óxidos es favorecida por las temperaturas altas (recuérdese la obtención del NO por el método del arco para la fijación del N_2 atmosférico). El NO es un radical, por consiguiente muy activo y el NO_2 es un enérgico oxidante.

Además de estos gases la combustión del carbón y petróleo inyecta en la atmósfera muchos más, entre lo que podíamos señalar los cancerígenos, como los derivados del pireno y algunos más. Podríamos resumir este cuadro señalando que la rama del conocimiento denominada Físico-química de la atmósfera indica claramente el interés por conocer los mecanismos que operan entre los diversos contaminantes vertidos a ella y su incidencia sobre la salud y/o el medio ambiente.

Con objeto de matizar los conceptos, es conveniente mencionar que existe una emisión natural de contaminantes, que no por ser natural, deja de ser inocua.

Quiero señalar con esto que gases como el SO_2 , SH_2 , CO, NO, NO_2 , NH_3 , HC y CO_2 se desprenden continuamente del suelo, es decir, que a nivel del suelo existe una fuente superficial como resultado de una fuente volumétrica

existente en el seno de la corteza terrestre. Como resumen, señalaremos que con la excepción de los gases SO_2 y CO , el resto de los gases mencionados poseen unas intensidades naturales superiores (a veces muy superiores) a las emisiones antropogénicas. Para tener una idea acerca de los Ordenes de magnitud, mencionaremos los casos del metano y del CO_2 . Para el primero la fuente natural es de $1,6 \cdot 10^9$ siendo la antropogénica unas 20 veces inferior. Para el segundo, la fuente natural de 1.012, unas 7 veces la antropogénica. Los valores anteriores vienen expresados en toneladas/año.

2.1. El efecto invernadero y el cambio climático.

Como es sabido, las moléculas, como conjuntos cuánticos de núcleos atómicos y electrones, interactúan con la radiación electromagnética, absorbiendo preferentemente unas determinadas frecuencias (y por tanto longitudes de onda), tras de lo cual quedan excitadas y/o ionizadas. La relación entre estas longitudes de onda y la intensidad de radiación absorbida constituye el espectro de absorción. Si una molécula es capaz de absorber una cierta longitud de onda, al desexcitarse la emitirá, y podrá registrarse el espectro de emisión. El enfriamiento de la Tierra, calentada previamente por la radiación solar que recibe, tiene lugar principalmente mediante la emisión de radiación infrarroja (llamada también calorífica), la cual se evadiría totalmente de la Tierra, atravesando la atmósfera, sino fuera porque al encontrarse con las moléculas de ciertos gases, es absorbida, quedando por tanto retenida en ella. Esos gases no son los constituyentes mayoritarios de la atmósfera, sino otros, como el CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2 , O_3 (troposférico) y los CFC. A consecuencia de esta absorción (y emisión) de la radiación, la temperatura de la atmósfera es superior a la que existiría en ausencia de esos gases. Este incremento de temperatura es el efecto invernadero.

Para tener una idea del orden de magnitud del poder de radiación a volumen constante, tomando el valor unidad para el CO_2 daremos los valores para los gases que se citan: 34 para el CH_4 , 160 para el N_2O y del orden de 1.500 para los CFC. Sin embargo, al referirse a este efecto suele atribuirse al CO_2 , lo que es correcto si se tiene en cuenta que las concentraciones de esos gases con respecto a la del CO_2 (354 ppmV) son de 0,005, $9 \cdot 10^{-4}$, 0 y 0 respectivamente, es decir despreciables en relación con las 354 ppmV del CO_2 .

El efecto invernadero se mide por el incremento de la temperatura media de la Tierra con respecto a una atmósfera que tuviese un contenido de CO_2 "natural", que se puede, lógicamente, tomar como el que existía anteriormente a la era

industrial, y que era de 280 ppm (V). Como todos los componentes atmosféricos, el CO_2 se halla sometido a un ciclo en el que se supone se mantiene constante su inventario total. Gráficamente podríamos decir que existe globalmente un equilibrio entre las tasas de producción y de sumidero naturales.

Ahora bien, como debido al desarrollo energético esa producción natural se ha visto incrementada en grado significativo por la antropogénica, ocurrirá que a menos que la capacidad de digestión de la Tierra vaya eliminando el exceso vertido a la atmósfera, tendrá lugar un aumento de concentración en ella y, por tanto, también de la temperatura. Se han elaborado diversos modelos predictivos de este aumento, obteniéndose unos resultados preocupantes, pues, como resumen de los mismos se puede señalar que el incremento de T será de unos 3° en el horizonte del año 2050.

Una variación de temperatura como ésta influirá dramáticamente en el clima terrestre, siendo esta la razón de que se haya comenzado a hablar del cambio climático. Más bien habría que decir que quizá se esté ya operando ese cambio, y que el dramatismo se producirá probablemente cuando se sobrepase una determinada temperatura.

En cualquier caso el cambio climático sería debido a las emisiones de CO_2 , bien entendido que ese cambio climático podría suponer un acontecimiento dramático para la Tierra y, por supuesto, para los diversos ecosistemas que soporta.

Debemos señalar que los valores de los futuros aumentos de la temperatura debidos al efecto invernadero son el resultado de los cálculos realizados en un sistema enormemente complejo mediante un modelo matemático, lo que indicaría que su fiabilidad es discutible, circunstancia que será comentada más adelante. Para comprender las incertidumbres que comporta la utilización de un modelo bastará recordar el efecto mariposa.

La predicción del modelo con sus catastróficas consecuencias (subida del nivel de los mares de 60 cm) no ha sido aceptada por algunos países, aunque la inquietud los afecte a todos.

Las centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles son fuentes puntuales de CO_2 (y otras sustancias), que se dispersan en el seno de la atmósfera, mezclándose con los demás constituyentes de ella. Existen, además, otras fuentes emisoras de CO_2 . Me refiero al tráfico automóvil, que se puede tratar como fuente extensa en una determinada ciudad, o de una fuente lineal, como es el caso de un vial. Estas fuentes utilizan ciertos derivados del petróleo (las gasolinas) o los gasoils. Aún podría hablarse de fuentes volumétricas si nos referimos al tráfico aéreo. En general los núcleos urbanos, no industriales, emiten contaminantes, un

70% de los cuales procede del tráfico y el resto del calor doméstico (calefacciones y agua caliente).

Aunque sólo posea un valor académico, voy a mencionar un efecto ambiental beneficioso asociado a la utilización de los combustibles fósiles. Me refiero al llamado efecto Suess, que consiste en que con el vertido del CO_2 a la atmósfera, exento de C-14, por razones de edad, se contribuye a disminuir el inventario de ese radionucleido cosmogénico en dicho medio, lo que comporta una menor dosis de radiación en el cuerpo humano.

3. LA FISIÓN Y SU INCIDENCIA SOBRE EL MEDIO-AMBIENTE.

A continuación procede considerar, aunque sea brevemente, los aspectos ambientales debidos a la utilización de la fisión en la generación de energía, en particular la incidencia sobre el medio ambiente de las CN, desde luego en operación normal. En comparación con las centrales térmicas convencionales, las nucleares se caracterizan por su menor impacto ambiental, cuestión sobre la que no vamos a insistir por ser muy conocida. Únicamente señalaremos que existen ciertos aspectos, que aunque resueltos técnicamente, no son aceptados por una gran mayoría de la población. Me estoy refiriendo concretamente a la gestión y destino definitivo de los residuos radiactivos de alta actividad.

4. EL PROBLEMA ENERGÉTICO.

Llegados a este punto estamos en condiciones de plantear el problema que se alza sobre la humanidad.

Si, como es perentorio, se desea mantener un crecimiento sostenido, en base a los recursos disponibles, es necesario desde ahora diseñar y seguir una Política consistente en controlar las emisiones de CO_2 a la atmósfera con objeto de evitar la catástrofe que los modelos predicen de aquí a pocos años.

El problema es de gran envergadura, pues un sistema de producción energética posee una gran inercia, y por ello sus respuestas a los cambios introducidos en el mismo son muy lentas. Se podría argumentar en el sentido de que, como no es seguro que los modelos sean fiables, no es necesario adoptar ninguna medida. Sin embargo, tal posición debe considerarse irresponsable, porque no se puede jugar a la ruleta rusa en un caso como éste, por lo que la más elemental prudencia obliga a considerar que los modelos son fiables, actuando en consecuencia.

Existen varias actitudes en la búsqueda de soluciones a este problema, actitudes que siendo en general respetables, adolecen quizá de cierto radicalismo. Me refiero concretamente al hecho del rechazo que ha provocado la energía nuclear por parte de amplios sectores de población, los cuales prescinden del uranio como fuente de energía, invocando en su lugar el ahorro energético y algunas energías renovables, como la biomasa y muchas veces la energía solar. No voy a hacer ningún comentario al respecto. Únicamente mencionaré que, en efecto, el ahorro energético puede contribuir a una disminución relativa del CO₂, lo que no ocurre con la biomasa; con respecto a la energía solar diré que hoy por hoy constituye más bien una esperanza que una realidad, cuantitativamente considerada.

4.1. Una solución al problema.

La solución, por consiguiente, estaría en la utilización del uranio como fuente de energía, pues la fisión no contribuye en absoluto a la emisión de CO₂; además, las reservas son, como decíamos al principio, tan grandes, sino más, que las del carbón. La estrategia a seguir consistirá en ir abandonando sucesivamente el carbón, el petróleo y el gas, precisamente por este orden, y sustituyéndolos por el uranio.

La solución que proponemos posee inconvenientes que vamos a tratar de considerar a continuación.

La cuestión más importante es la de los accidentes nucleares, acerca de los cuales se posee bastante experiencia. Sin entrar en los detalles y manteniéndonos en una postura conservadora, debemos señalar que un accidente nuclear como el de Chernobil puede afectar a una gran extensión del planeta, pudiendo ser particularmente severo en un área relativamente modesta (unos 30 km²) alrededor de la central.

Vamos a hacer un comentario acerca del impacto radiológico global de un accidente como el de Chernobil. Señalaremos que los incrementos de radiactividad serían perfectamente tolerables, comentario que sería probablemente puesto en tela de juicio por la mayoría de la población, que parece sentir horror a todo lo que se relaciona con la radiactividad, debido quizá al hecho de no tener en cuenta que todo nuestro entorno es radiactivo y que por ello la dosis media que recibe un individuo de la colectividad, no expuesto profesionalmente (de unos 200 mrem al año) es muy superior probablemente a la que introduciría un accidente como el de Chernobil, donde hubo un escape catastrófico de radioactividad al medio ambiente. Como es conocido este escape se produjo porque el reactor

no disponía del edificio de contención, destinado a retener los efluentes originados en el accidente. En el reactor de Harrisburg, la radioactividad apenas salió hacia la atmósfera, y el impacto radiológico fue prácticamente nulo.

Lo que hemos dicho no debe interpretarse en el sentido de que los accidentes nucleares sean tolerables, sino que muy probablemente un accidente de este tipo no supondría un acontecimiento de características globalmente catastróficas.

En relación con la seguridad nuclear, debemos además señalar los riesgos que se deben a la penetración horizontal de las centrales nucleares, circunstancia a la que, en principio, nadie debería oponerse. Me estoy refiriendo al hecho de que la seguridad de cualquier reactor puede depender de ciertos aspectos del desarrollo científico-técnico, aspectos que van desde la formación del personal de la Instalación, que se da por supuesto, hasta el desarrollo del propio país que administra la central.

Por consiguiente, resulta de importancia primordial que la seguridad de los reactores alcance grados superiores a los actuales ¿Cómo conseguirlo?

Hablemos primero brevemente de los fundamentos.

Para que una reacción de fisión se automantenga es necesario que la constante de multiplicación sea mayor que la unidad, el exceso sobre uno es necesario para ir haciendo frente al consumo de combustible. Con $K_{\text{eff}} < 1$ se puede, no obstante, llegar a establecer un estado estacionario (no estrictamente crítico) con tal de suministrar, independientemente de las propias fisiones del uranio, una cantidad adecuada de neutrones, proporcionada, por ejemplo, por una fuente extra de esas partículas. Retirada la fuente, se haría $K_{\text{eff}} < 1$ y la reacción de fisión acabaría deteniéndose. Con $K_{\text{eff}} < 1$ el sistema posee una seguridad intrínseca total. Dicho de otra manera se trata de utilizar reactores subcríticos (conjuntos subcríticos) de uranio o de torio en los que la fuente extra de neutrones es una fuente externa fácilmente controlable que produce neutrones mediante reacciones de desgajamiento entre un haz de protones de aproximadamente 1 Gev generados en un acelerador de partículas y un blanco de metales pesados. El conjunto, dotado del correspondiente sistema para la conversión de la energía liberada en las fisiones en energía eléctrica, ha de ser capaz de producir más energía que la consumida en la producción y aceleración de los protones del haz. La utilización del torio como combustible produciría menos cantidades de residuos de vida larga y se podría construir en cualquier tamaño.

Lo que más importa en este reactor, que también se le ha llamado nodriza, es la seguridad, pues eliminado el haz de protones, se pasa a una situación subcrítica, de muy fácil control.

Por consiguiente, y a modo de resumen, nos atrevemos a sugerir que una posible solución al problema del CO₂ debe consistir en la sustitución progresiva de las centrales de carbón, petróleo y gas por centrales nucleares de la máxima seguridad, un tipo de las cuales podría ser el reactor nodriza.

Otras contribuciones, como el ahorro energético, así como la de otros combustibles convencionales menos contaminantes que los actuales, pueden también obviamente ir sustituyendo a los más contaminantes, todo en favor de limitar y acaso disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Para terminar me voy a referir brevemente al tráfico automóvil, señalando que quizá fuese también conveniente, a los efectos de disminuir las emisiones de CO₂, comercializar el automóvil eléctrico.

Algunas referencias bibliográficas consultadas:

* **Alvarez, MC y Garzón, L.: 1989;** *Assesment of radioactive emissions from Spanish coal power plants: radiactive releases and associated risks.* Health Physics, 57,5.

* Hoyle, F.: 1981; *¿Energía o extinción?* Alianza Editorial, S.A. Madrid.

* Instituto de la Ingeniería de España: 1993; *Consideraciones sobre la demanda de energía.* Comité de Energía y Recursos naturales.

* Lippmann, M. y Schlesinger, R.: 1979; “*Chemical contamination in the Human Environment*”, Oxford University Press.

* Meadows, M. Meadows, D.L., Randers, J.: 1992; *Más allá de los límites del crecimiento.* El País, Aguilar, S.A. de Ediciones, Madrid.

* Varios: 1971; *Energy.* Scientific American, 224, 3.