

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

**DISCURSO INAUGURAL
DEL AÑO ACADÉMICO 1997-1998**

LEÍDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 22 DE OCTUBRE DE 1997

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. LUIS GUTIÉRREZ JODRA

SOBRE EL TEMA

EN TORNO A LA ENERGÍA



MADRID
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22 TELÉFONO - 521 25 29
1997

Depósito Legal: M. 37191-1997

Reproducido en Realigraf, S.A. - Pedro Tezano, 26 - 28039 Madrid

En torno a la energía

Introducción

En la Historia de la Humanidad pueden distinguirse tres grandes períodos que corresponden a tres grandes fuerzas organizativas que han moldeado la sociedad y la civilización. La primera de estas fuerzas fue la Agricultura, la segunda ha sido la Industria y la tercera, que acaba de iniciarse, la Tecnología de la información.

A ellas les corresponden tres fuentes energéticas principales: la madera, los combustibles fósiles y la electricidad.

Hay también un efecto cíclico. En el primero de los períodos, la sociedad está individualizada. Las únicas muestras de agrupación, sobre todo al final del período, son los gremios o la organización feudal. En el segundo, se crea la fábrica, el proletariado, los sindicatos. Se llega a la centralización, al gran tamaño, a las grandes fábricas e instalaciones y al comienzo del gran público como destinatario de todo, para lo que se crea la producción masiva y la línea de montaje.

En el tercero, que ahora comienza, se vuelve a las pequeñas unidades. En el campo energético en aras de la libertad se va hacia la autogeneración y el empleo de energías diluidas.

Simultáneamente y por el contrario, se crean los grandes consorcios, las multinacionales, que cruzan y no tienen en cuenta las fronteras. Hay confusión. En ciertos casos lo pequeño es hermoso, Schumpeter. En otros, sólo lo grande es capaz de forjar el futuro. Conviven así las ideas de la unificación de esfuerzos –Unión Europea- y las regiones como expresión de unidades definidas, que resurgen de la etapa anterior a las naciones.

La tecnología de la comunicación conduce a la globalización de todas las noticias los problemas y las soluciones aunque sigan manteniéndose las peculiaridades diferenciadoras lo que provoca el mantenimiento de dualidades a veces difíciles de resolver.

El problema de la energía para mantener vivo el desarrollo histórico tiene que acompañar el desarrollo general. La energía es apoyo y base de todo desarrollo, es imprescindible como el alimento o el aire, pero no es motor. El motor, como veremos después en lo que sigue, es el hombre y sus frutos, las ideas, que en lo práctico descansan en la ciencia y en la técnica para conseguir sus objetivos.

Desarrollo histórico.

La Agricultura es el primer resultado del esfuerzo humano, con la utilización de los 60 ó 75 vatios de potencia instantánea de que dispone por medio de sus músculos. El primer medio auxiliar que emplea son los animales domados, lo que multiplica por 10 la potencia a su alcance, que además puede ser utilizada en períodos de tiempo más largos. El descubrimiento, probablemente accidental, del fuego, además de la luz y el calor, da al hombre primitivo un medio más que el secado al sol para transformar y conservar los

alimentos de que dispone. El uso de la madera conduce al talado de los bosques y a la creación del suelo agrícola, lo que contribuye a fijar la población, evitando el nomadismo.

La segunda expansión de la energía de los humanos, si no coincidente y en paralelo con la primera y obviamente mucho más cruel, es la esclavitud. Una persona acomodada como Cicerón, ya mucho después, se dice que tenía 50 esclavos, que viene a ser energéticamente lo que ahora es común en muchos hogares de un país desarrollado.

Los animales son utilizados siempre en los trabajos más rudos en toda Euroasia, sobre todo después de la invención de la rueda, y no tanto en América, donde al no conocerse la rueda, no se pasa de la esclavitud para estos trabajos.

Otros instrumentos o medios de generación o utilización de la energía son muy antiguos. La noria ha sido ya descrita en el siglo III antes de Cristo. Los molinos de agua y de viento del Oriente medio fueron incorporados y extendidos en Europa.

En tiempos de Guillermo I el Conquistador había ya en el siglo XI en Inglaterra 5.000 molinos para una población entonces de 2 millones de habitantes.

En todo este tiempo el primero y único combustible es la madera y su derivado el carbón vegetal. Las propiedades mecánicas inherentes hacen además a la madera el material de construcción más versátil para todo tipo de máquinas. Basta para ello repasar los bocetos de Leonardo da Vinci para todas sus invenciones.

También en todo ese tiempo sólo hay un pequeño incremento del consumo energético per cápita, que se mantiene así a través de toda la Edad Media y prácticamente hasta el siglo XVIII. Con estos medios se hicieron las grandes maravillas, conservadas o no, de las ciudades antiguas, los acueductos, foros, teatros y circos de Roma, los monumentos de Egipto, Oriente Medio, la India, China y Grecia y sin el uso de la rueda los de Meso-, Sur- y Norteamérica.

La artesanía crea y desarrolla las aplicaciones para las que la energía es imprescindible. Conocimientos científicos elementales sirven para crear los talleres que dan origen a la alfarería, la imprenta, las joyas, los objetos metálicos y de vidrio y otros muchos, así como las máquinas para elevar agua, los batanes para las fibras textiles, mover telares, la inyección de aire en las fraguas y forjas, el machaqueo y trituración de los minerales, el corte y preparación de la madera, el batir los metales y mover los martillos pilones y el trefilado, la preparación de la pasta de papel descrita ya en España en 1144, entre otros muchos ejemplos.

En el siglo XVII se empleaban ya grandes ruedas hidráulicas. A semejanza del artificio de Juanelo para elevar agua del Tajo a Toledo, el suministro de

agua a los jardines de Versalles se hacía con una rueda de 100 C.V. En el siglo siguiente los Países Bajos disponían ya de 12.000 molinos. Había incluso en Londres molinos que empleaban las mareas.

Todo cambia en el siglo XVIII. Después de numerosos prototipos y ensayos aparece la máquina de vapor, que se basa ya en el segundo combustible —el carbón mineral— que constituirá la señal más distintiva de lo que ahora llamamos la Revolución Industrial.

Aparecen entonces el acero, no el acero selecto de los hititas o de las espadas toledanas o de Damasco, sino el acero masivo de construcciones, herramientas, utensilios y máquinas, la potencia sin más límites que la disponibilidad de máquinas y combustible y las fábricas en contraposición a los talleres artesanos. El transporte se hace así más efectivo tanto en tierra —ferrocarril— como en la mar —barco de vapor—.

Surge así también el primero de los problemas sociales que acompañan siempre a los grandes avances de la ciencia o de la tecnología, la creación del proletariado o clase obrera y del capitalismo como sistema económico. Aparecen las grandes fortunas y los movimientos de capitales dan lugar así a las primeras grandes empresas tanto nacionales como transnacionales y multinacionales. Y, de manera brusca, el empleo masivo del carbón en las grandes ciudades y del transporte urbano basado en los animales de tiro origina la contaminación del suelo, de la atmósfera y de los edificios.

El siglo XIX aporta el desarrollo de la electricidad y del motor de explosión gracias a los grandes descubrimientos de los yacimientos de petróleo, tercer combustible de la humanidad junto con el gas natural, que sustituye inicialmente en la iluminación a la cera y el aceite de ballena o de oliva en los países mediterráneos, pero que debe su mayor empleo a la aplicación del motor al transporte terrestre y marítimo y después, ya en el siglo XX, al aéreo.

La sistemáticas de la investigación que aporta este nuestro siglo da lugar al cuarto de los combustibles: el Uranio y su homólogo el Torio. Este siglo ha sido testigo del más espectacular desarrollo de la humanidad en todos los campos. En el energético cualquiera de los indicadores, como es, por ejemplo, el consumo medio por habitante y año que aparece en la figura 1 nos da una imagen de lo que hemos comentado de forma somera.

Inicialmente el hombre primitivo consumía todos sus necesidades energéticas en su alimentación. Al convertirse en cazador requirió ya una parte para sus necesidades domésticas (fuego e iluminación), que aumentaron y se completaron con los consumos en Agricultura y Artesanía al pasar a la etapa más larga de la Historia de la Humanidad, proceso que continuó con el gran desarrollo de la industria y del progreso tecnológico, después de la 2ª Guerra Mundial.

Papel de la Energía en nuestra Sociedad.

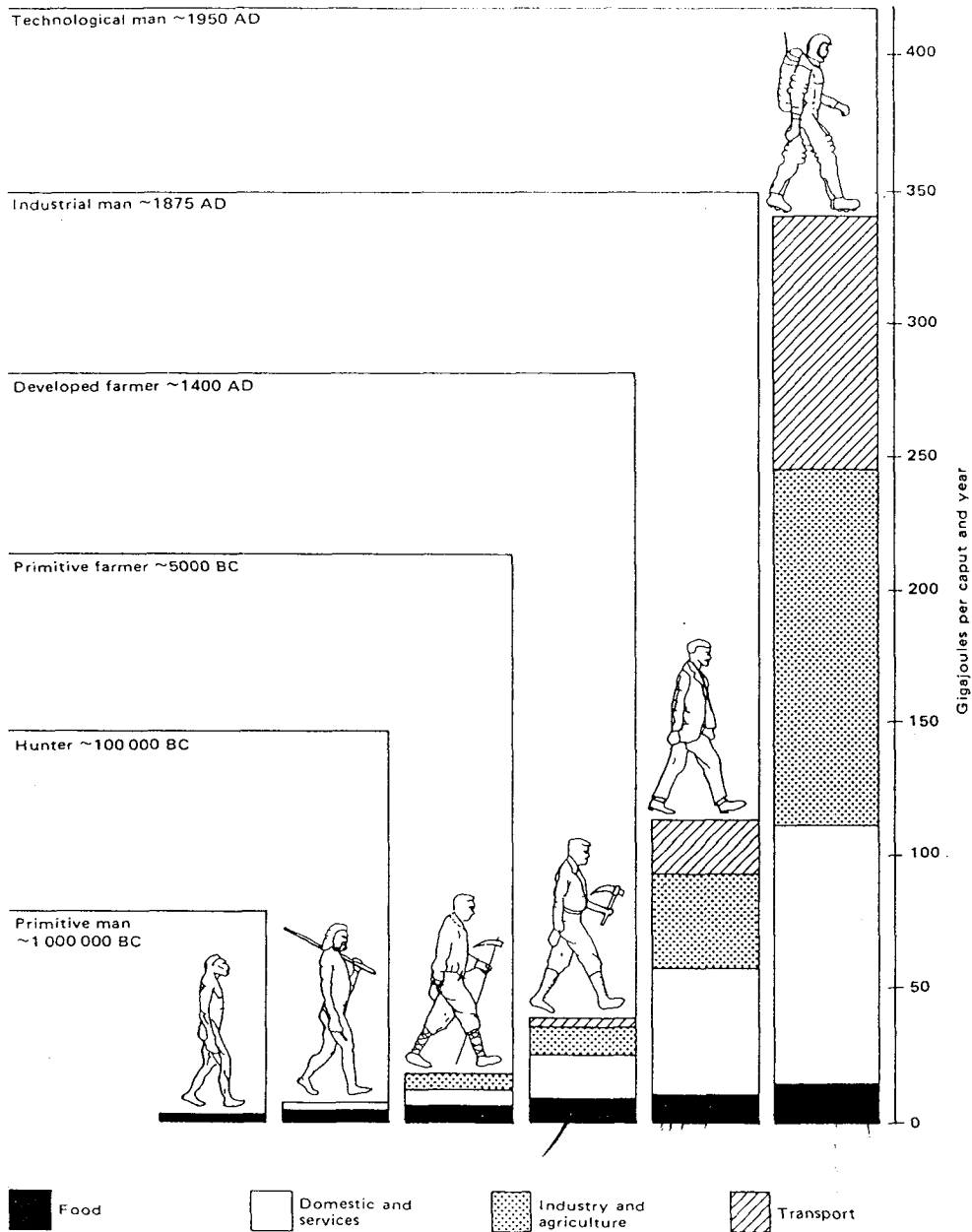
Toda la energía que emplea la Humanidad, con la excepción, paradójicamente, de la energía nuclear tiene su origen más o menos remoto en el Sol. De una manera directa la que recibimos con la alternancia de días y noches y que a través de la formación de biomasa y de organismos dio lugar en el pasado a los combustibles fósiles. De forma indirecta el viento, el ciclo del agua y los movimientos y diferencias de temperatura de los mares y océanos son debidos también en gran parte al Sol.

Las notables excepciones de la energía debida al Uranio y al Torio y de la energía geotérmica almacenada como consecuencia de su desintegración se deben más bien a los fenómenos previos a la explosión de la Supernova de la que al parecer procede la Tierra, según los cuales los citados elementos pesados crecieron nuclearmente a partir de los ligeros por la elevada población de neutrones en el interior de la estrella.

Un esquema de los flujos energéticos de la Tierra se da en la fig. 2. Parece en un primer examen que la cantidad anual que recibimos del Sol es varios miles de veces el consumo energético mundial. Sin embargo, sólo un 25% se invierte en procesos que puedan por ahora ser utilizados tecnológicamente y económicamente, lo que incluye las energías hidráulica, eólica y basada en la biomasa, y queda aún el último escollo del rendimiento con que estas energías pueden ser empleadas prácticamente lo que es aplicable también a la energía de las mareas y de las olas y al calor geotérmico.

Es evidente que en nuestra sociedad la energía está presente en todo tipo de actividades sean estas domésticas, industriales, comerciales o simplemente lúdicas.

Figura 1



Individual energy consumption. The services sector includes teaching, trade, office work, etc. (Adapted from Unesco Courier.)

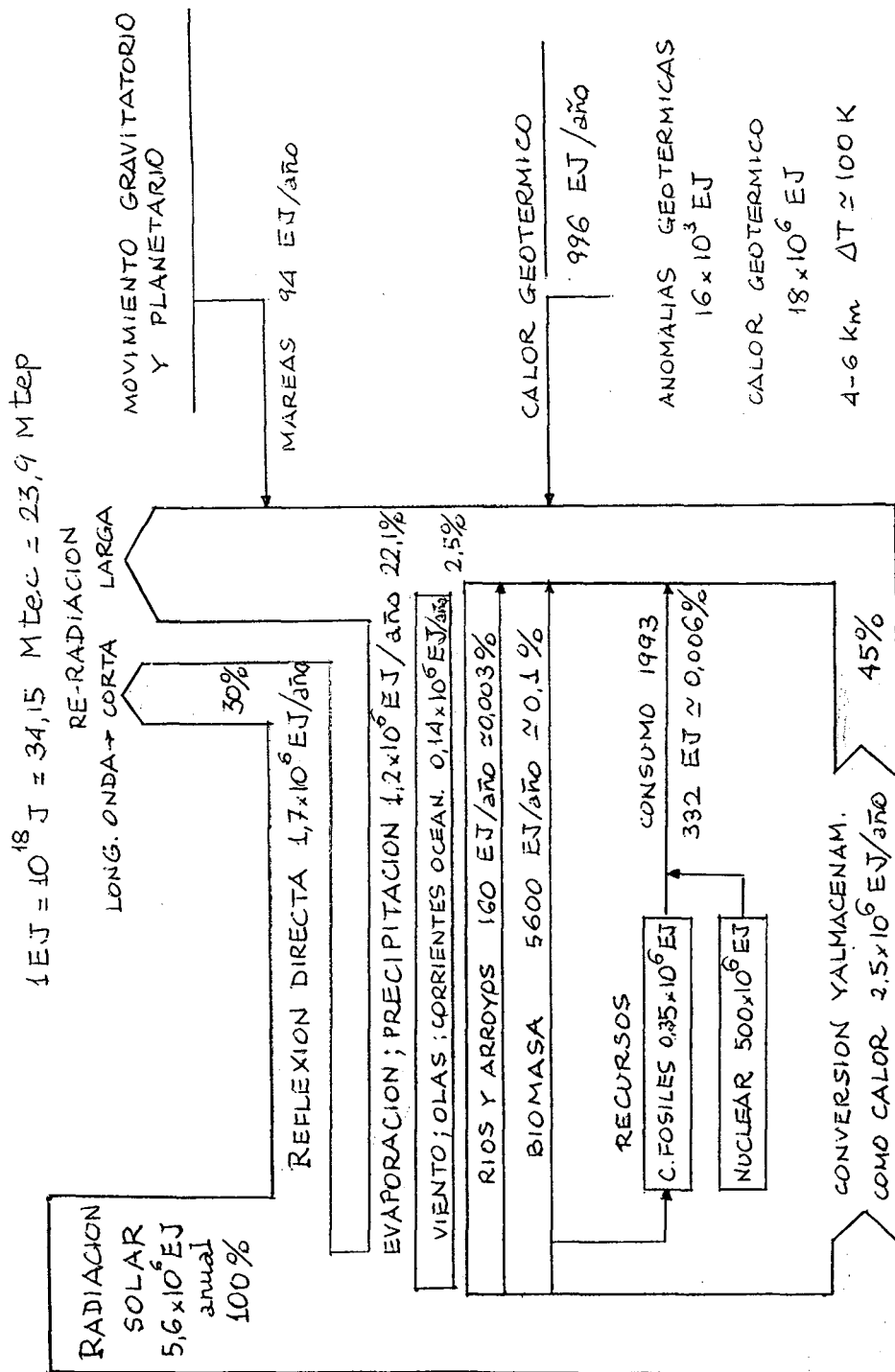


Figura 2

FLUJOS ENERGETICOS DE LA TIERRA

Nuestros alimentos, directamente por la contribución mecánica en la preparación del suelo, siembra y recolección o indirectamente por el empleo de fertilizantes y plaguicidas o por la posterior transformación, mezcla, conservación, transporte o refino, entre otros procesos.

Algunos ejemplos típicos se presentan en la Tabla-1 referidos a materias tan diversas como lechuga, pescado, azúcar, aceite, chocolate o cerveza. Lo mismo ocurre en nuestros hogares en los que preferentemente se utiliza la electricidad. Consumos de diversos aparatos domésticos como lavavajillas, lavadora, televisor, cocina o frigorífico, que evidentemente son valores medios para consumos y potencias normales, se dan en la Tabla-2.

Tabla-1

Costes energéticos de producción, tep/ton

Bizcochos, pastas	0,17
Chocolate, pasteles	0,2
Azúcar	0,24
Lechugas	0,4
Pescado	1,2
Aceite	0,2
Cerveza	0,06

Tabla-2

Consumo de electricidad, kWh/año

Termo eléctrico 200 litros	1.850
Cocina eléctrica con horno	1.300
Lavavajillas	900
Frigorífico 200 litros	440
Lavadora	430
Televisor color	93
Radio	20
Alumbrado piso o casa pequeña	700

Otra forma de establecer el componente energético incluido en el valor de diversos bienes de consumo o utilización consiste en dar la cantidad de energía en forma de crudo petrolífero que se requiere para producir determinados objetos, sustancias u operaciones. Así, en la Tabla-3 se presentan las cantidades de crudo equivalente necesarias para producir 1 kg de azúcar, de tejido sintético y de pescado cocinado, para construir y alumbrar una casa, cocinar en ella para 4 personas y para fabricar un automóvil pequeño y recorrer con él 12.000 km anuales.

Tabla-3
Costos energéticos.

Producir 1 kg azúcar	0,4	kg
Producir 1 kg tejido sint.	5	"
Pescar 1 kg pescado y cocinarlo	1,2	"
Construir casa de 100 m ²	10.000	"
Alumbrar 1 año	200	"
Cocinar para 4 personas durante 1 año	200	"
Fabricar un coche de 1.000 kg	1.300	"
Recorrer en él 12.000 kg en 1 año	1.300	"

Los productos industriales necesitan cantidades de energía específicamente diferentes según el proceso de obtención o de fabricación como puede comprobarse en la Tabla-4 en toneladas equivalentes de petróleo por tonelada o expresado como fracción del coste de energía referido al coste total de fabricación o producción en la Tabla-5, que pueda dar quizás un valor más indicativo de la influencia de la energía.

Tabla-5

La energía en la industria

Tipo de Industria	% de la energía en el coste total
Aluminio	20-30
Siderurgia	20-40
Cemento	30-50
Yeso	40-60
Vidrio	10-20
Fibras sintéticas	12-20
Papel y cartón	25
Productos alimentarios	4-16

De particular importancia es el empleo de la energía para el transporte. El consumo global de carburantes como se verá más adelante, es importante respecto a la demanda total de productos petrolíferos.

Tabla 4

Metales y aleaciones

Chapa y hojalata	0,12	Tep/tonelada
Aluminio	4,02	“
Cobre	0,62	“
Zinc	0,11	“
Ferrosilicio	3,40	“

Gases industriales

Oxígeno	0,25	“
Nitrógeno	0,18	“
Amoniaco	0,63	“
Argon	0,49	“

Materiales de construcción

Cemento	0,11	“
Cal	0,10	“
Porcelana sanitaria	0,91	“
Vidrio de luna	0,32	“

Fertilizantes

Superfosfato	0,013	“
Urea	0,17	“
Nitrato amónico	0,05	“
Sulfato potásico	0,09	“

Productos químicos

Acido sulfúrico	0,02	“
Acido fosfórico	0,28	“
Acido nítrico	0,05	“
Carburo cálcico	0,96	“

Fibras y caucho

Rayón	3,58	“
Poliester	1,67	“
Poliamida	0,52	“
Fibrana	1,81	“
Caucho sintético	0,59	“

Papel y pasta

Celofán	2,36	“
Papel prensa	0,47	“
Papel y cartón kraft	0,94	“
Pastas papeleras	1,26	“

En la Tabla-6 se detallan los consumos medios de automóviles, autobuses, trenes y aviones en función del número de pasajeros y del tipo considerado de vehículo o medio de transporte

Tabla-6

Consumo de derivados del petróleo, gramos/km

		Pasajeros	
		<u>1</u>	<u>2</u>
Automóvil	Utilitario	67	35
Autopista	2 litros	93	50
Autobús Urbano		35	
Autobús Interurbano		21	
Metro		23	
Tren cercanías		18	POR
Taco		20	PASAJERO
Avión Casa o Fokker		173	
Airbus		37	
Avión transoceánico		29	

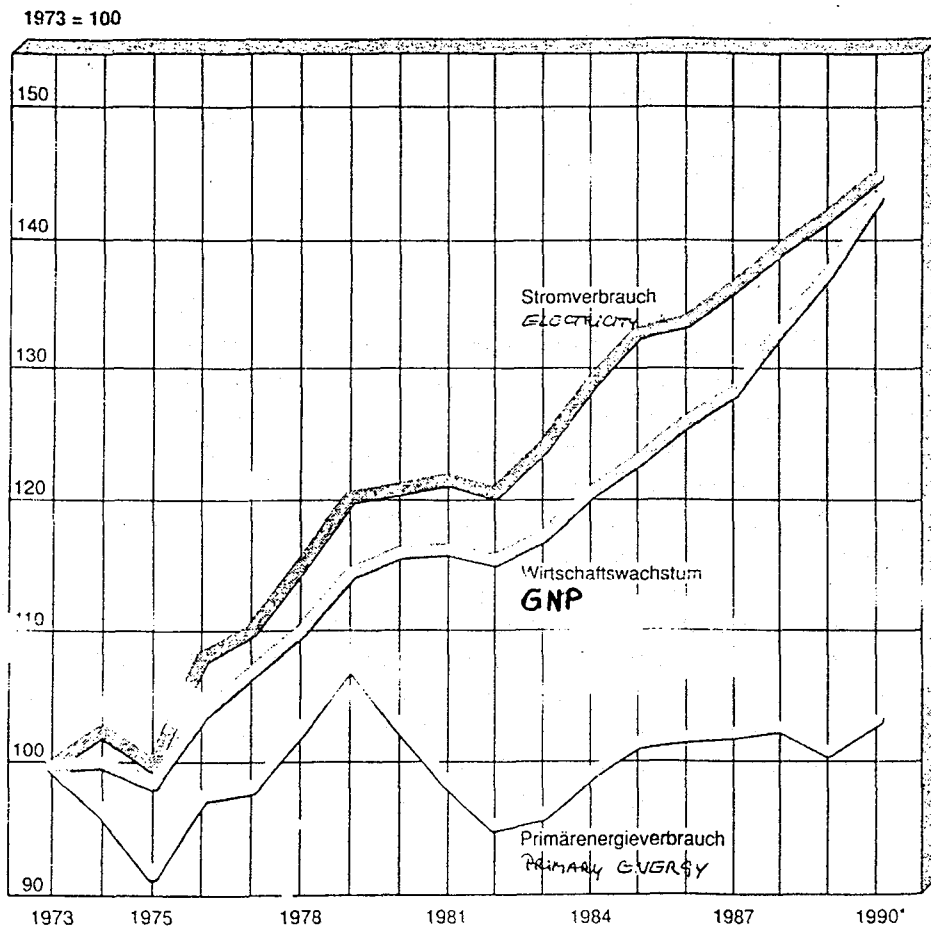
El empleo intensivo de máquinas es distintivo de nuestra sociedad. Las grandes obras públicas realizadas para las comunicaciones en superficie y subterráneas, carreteras, túneles y los grandes proyectos de presas y canalizaciones, el transporte masivo de petróleo y gas natural, el creciente empleo de trenes superrápidos con potencias de varios megawattios, de aviones cada vez mayores y de petroleros que debían pasar por el Sur de Africa son ejemplos suficientes del uso y utilización de la energía para ser construidos y para funcionar.

Sin embargo, los consumos energéticos son todavía muy diferentes entre las distintas zonas y países del mundo. En los países industrializados el consumo de energía primaria, gracias a los esfuerzos de todo tipo para hacer más eficiente el consumo de energía en la industria, se ha estacionado a pesar del aumento del nivel de vida y del bienestar. Por el contrario, el consumo de electricidad ha aumentado en dichos países siguiendo un camino sensiblemente paralelo al del progreso del producto interior bruto. Tales son los casos de Alemania en la figura 3 y de Estados Unidos en la figura 4.

Figura 3

Wirtschaftswachstum, Primärenergieverbrauch und Stromverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland

CASE OF GERMANY: PRIMARY ENERGY, ELECTRICITY AND GNP -



SOURCE: STEINKOHLE 1990

Unlike Energy, U.S. Electricity Consumption Has Tracked GNP

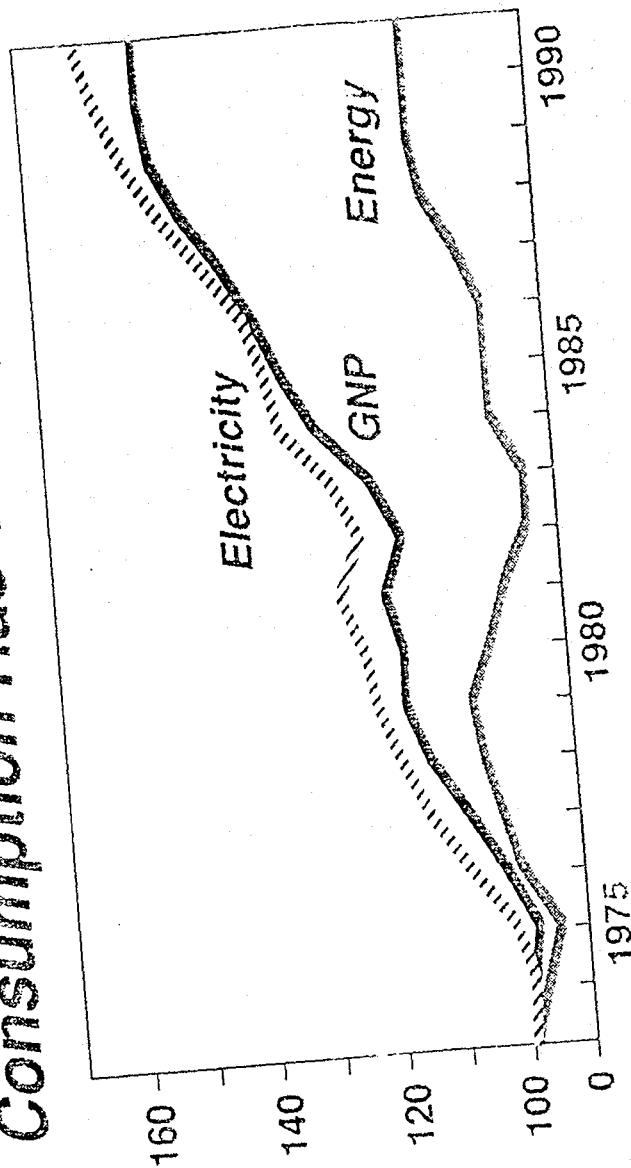


Figura 4

Presentation by Stephen D. Bechtel, Jr.
Nuclear Energy Forum
November 12, 1991

Tipos de energía, orígenes y características.

La definición clásica de energía, como capacidad de producir trabajo, no distingue entre las diversas clases de trabajo y tampoco evidentemente de los distintos tipos de energía. Será preciso, por tanto, apuntar sus características generales y específicas.

Dos son dignas de ser destacadas. La primera, su convertibilidad; la segunda, la dificultad de su almacenamiento, que en algunos casos se convierte en imposibilidad. De la primera se derivan varias consecuencias: el concepto del rendimiento al pasar de un tipo a otro y la categorización de los tipos de acuerdo con este rendimiento, pudiéndose hablar de energías nobles y de energías degradadas.

Los principales tipos de energía y el fenómeno o instalación donde se realiza la transformación de uno en otro se dan en la figura 5.

Aparecen en ella las principales fuentes energéticas actuales. En primer lugar, los combustibles fósiles –carbón, petróleo y gas natural– en que la energía está almacenada en forma de energía química, que por su combustión se convierte en energía térmica. La energía hidráulica así como la eólica y la contenida en los movimientos de los mares y los océanos, bajo el nombre de energía mecánica, cuando el agua o el aire se mueven. La energía nuclear que, por el momento convierte la fisión del Uranio o del Plutonio en calor. Y la energía luminosa que por medio de la fotosíntesis origina la biomasa y por el efecto fotovoltaico directamente electricidad.

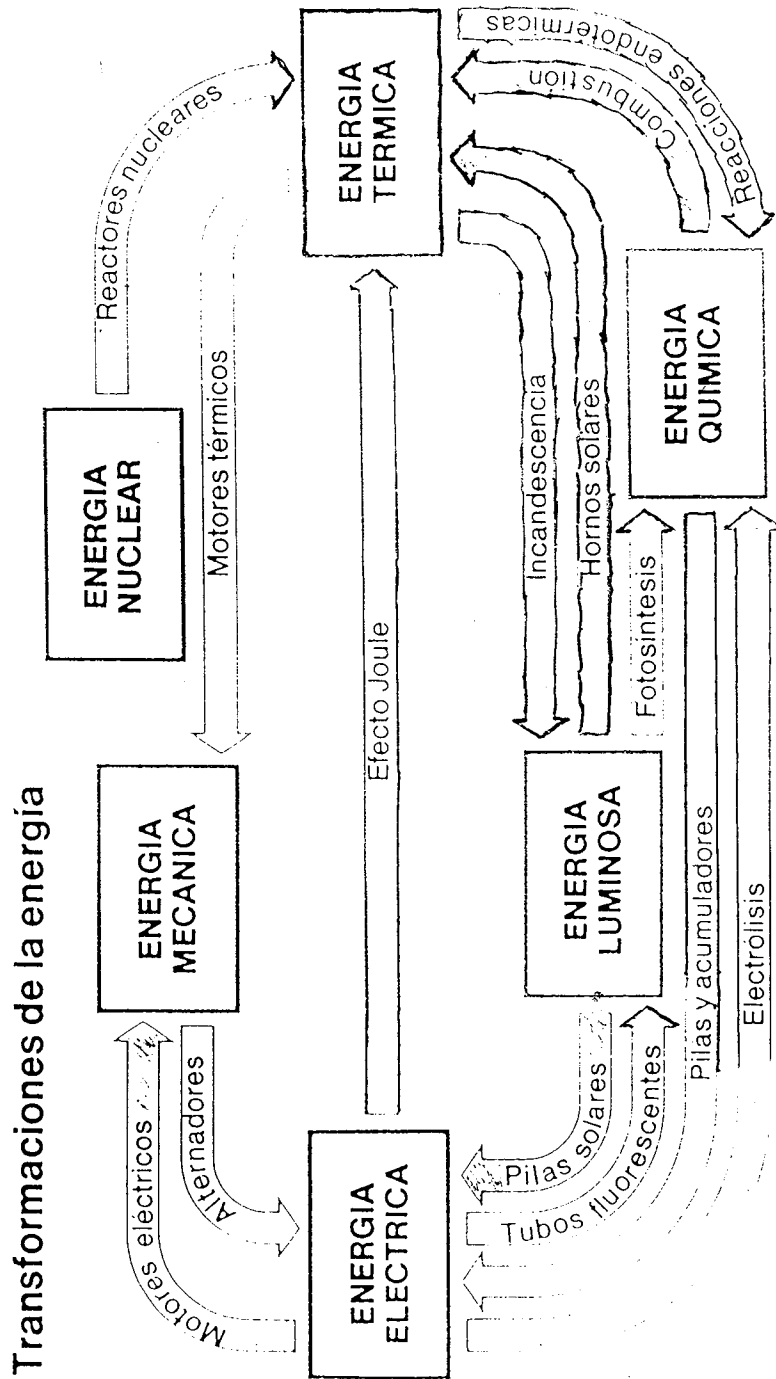
La energía más degradada, el calor, sirve, no obstante para obtener energía mecánica con máquinas de vapor o turbinas y a su vez puede convertirse directamente en electricidad. No importa que su origen sea la combustión de biomasa o de combustibles fósiles, la energía solar o la diferencia de temperaturas en los océanos y en la corteza terrestre.

Aparte del límite teórico de la conversión de la energía térmica en energía mecánica dado por el ciclo de Carnot en el resto de las transformaciones energéticas el rendimiento depende de la ineficiencia del sistema empleado por lo que varía entre amplios límites tal como aparece en la Tabla-7.

Tabla-7
Rendimientos en la conversión de energía, %

Lampara de incandescencia	3
Locomotora de vapor	7
Tubo fluorescente	22
Motor de automóvil	23
Central nuclear	32
Central térmica	40
Turbina de vapor	46
Motor eléctrico	95
Cogeneración	60

Figura 5



El diverso origen básico de las fuentes energéticas condiciona una de las características más importantes de los tipos de energías, el contenido intrínseco energético. Utilizando la figura-3 como base, revisemos cómo son los diversos tipos de la llamada energía primaria desde este punto de vista.

Comencemos por la energía más antigua, la energía mecánica. Los dos tipos, potencial y cinética, tienen límites prácticos de utilización, pero en muchos casos la energía puesta en juego es del orden de diezmilésimas de electrón-voltio*. La energía luminosa, como es también una energía muy diluida salvo en el caso de muy bajas longitudes de onda, suele requerir una etapa de concentración antes de ser empleada.

La energía de las reacciones de combustión, el calor de reacción, es del orden de los electrón-voltios, ya que se trata de reacciones muy exotérmicas en comparación con muchas otras reacciones químicas, y en el caso de las reacciones nucleares, tanto de fisión como de fusión, los valores de la energía de reacción suelen ser del orden del millón de electrón-voltios.

De esta diversidad de potencia específica de los distintos tipos de energía se derivan consecuencias evidentes, como son el consumo del combustible necesario a igualdad de energía producida y los riesgos de la utilización de las energías más concentradas, que a su vez se traducen en la dependencia o independencia que procuran unas y otras por las cantidades a almacenar para disponer de reservas suficientes y por la necesidad de criterios más o menos estrictos en su utilización.

Una forma sencilla de comprobar esta diferencia entre las diversas fuentes es el consumo anual de los combustibles necesarios para una gran central eléctrica de 1.000 MW como se ve en la Tabla-8.

Tabla-8
Consumo anual de combustible
Central Eléctrica de 1.000 MW.

Central solar fotovoltaica.....	40 km ²
Central eólica	500 unidades de 200 KW
Central térmica de carbón	5 millones de toneladas
Central térmica de lignito	8 millones de toneladas
Central térmica de fuelóleo	2,5 millones de toneladas
Central nuclear	35 toneladas de Uranio con un 2,5% de Uranio-235

Es evidente que los consumos demuestran de manera patente la diferencia entre energías diluidas y concentradas y las que existen asimismo entre los combustibles fósiles y los nucleares.

* Electrón-voltio es la energía que adquiere 1 electrón al pasar a través de un campo eléctrico en que hay una diferencia de potencial de voltio. Es la unidad corrientemente utilizada en las reacciones nucleares.

Recursos, distribución y cuestiones relacionadas.

Una de las cuestiones más discutidas cuando se trata de la energía es la existencia o no de reservas de combustible para uso de nuestras generaciones y el de las generaciones futuras, lo que implica, además de consideraciones técnicas, otras de índole ética, social y económica.

No es fácil encontrar valores fidedignos, en muchos casos por falta de estadísticas fiables, en muchos otros por criterios diferentes tanto para evaluar reservas como para estimar las demandas atendidas y siempre por la dificultad de estimar los diversos combustibles empleados y asignar a las cifras valores en unidades energéticas comparables.

Las estimaciones a escala global tienen además el inconveniente de las diversas clasificaciones de las reservas en función del contenido en combustible útil. Se habla así de reservas comerciales, reservas convencionales, reservas geológicas, reservas seguras y algunas otras semejantes.

Del conjunto de datos existentes, tanto de reservas como de consumo o demanda, hemos seleccionado los que a nuestro juicio pueden considerarse como más razonables. Debe tenerse en cuenta que la coincidencia es mayor en el caso de las reservas comerciales que en las no convencionales o en las llamadas recursos geológicos. Por ello estas últimas cifras deben ser consideradas como dadas con un mayor margen de error.

Las reservas de las energías no renovables, clásicas o de combustibles fósiles y nucleares se presentan en la Tabla-9.

No se incluye entre los recursos el Torio, para el cual aún no hay empleo práctico para la generación de energía, aunque se estima que las reservas geológicas son unas cuatro veces superiores a las del Uranio.

A fin de establecer una unidad coherente se ha elegido la tonelada equivalente de petróleo que macroscópicamente es la más corrientemente utilizada en estas estimaciones.

En muchos casos juega un papel importante la tecnología de que se dispone actualmente. Si se tuvieran en cuenta todos los recursos, con gran probabilidad se obtendrían resultados semejantes a los obtenidos en el caso del Uranio y que se representan en la figura-6. Puede observarse cómo a medida que se consideran minerales con menor contenido en elemento útil aumentan rápidamente los recursos.

El significado de las reservas se evidencia mejor si se compara con los consumos de cada tipo de combustibles, dados en la Tabla-10, donde también se han incluido los años de duración de las reservas si se mantuvieran en el futuro las mismas cifras de consumo que en 1995.

Deben destacarse dos características que aunque hayan sido mencionadas y repetidas numerosas veces, no son suficientemente tenidas en cuenta a efectos de acciones y decisiones. La primera es la corta duración de las reservas de petróleo y gas natural, sobre todo considerando que el consumo de ambos combustibles continúa aumentando en el mundo y hoy por hoy el consumo de petróleo es con mucho el mayor de todos los combustibles que se emplean por nuestra sociedad. Estas consideraciones se repiten con frecuencia, especialmente por grandes compañías petrolíferas en sus estudios de prospectiva considerando el aumento tanto del consumo, como de las reservas. Las predicciones de Chevron en 1987 y de Shell en 1992 se dan en las figuras 7 y 8.

Tabla 9

**Reservas mundiales de combustibles. Energías no renovables
(1994-1995), Gtep.**

Combustibles sólidos	
Carbón y Lignito	607
Recursos	<u>3.400</u>
	4.007
Petróleo	
Convencional	137
Recursos	200
Crudos pesados	75
Asfaltos	70
Pizarras bituminosas	<u>450</u>
	932
Gas	
Convencional	108
Ultimas	<u>220</u>
	328
Uranio	
Convencional	57
* Ultimas	<u>130</u>
	187
Convencional	2.850
** Ultimas	<u>6.500</u>
	9.350

* En los reactores comerciales de agua ligera 1 tonelada de Uranio se considera equivalente a unas 10.000 tep.

** En reactores reproductores.

La segunda es que las mayores reservas corresponden al Carbón y al Uranio, que, por causas diversas, parecen tener mayores obstáculos para su empleo en gran escala.

Una advertencia que debe hacerse sobre estos datos de duración de las reservas es que las reservas cambian continuamente, bien por nuevos yacimientos o por avances de la tecnología y la demanda a pesar de todos los esfuerzos por conseguir el ahorro energético máximo posible, sigue creciendo en el mundo. Evidentemente su cociente se ha mantenido más o menos constante durante las últimas décadas, lo que significa que, a pesar de la reducción de reservas por el consumo, las reservas han aumentado en todas ellas. No obstante, las cifras son aproximadas y son por ello puramente indicativas.

En el caso de las energías renovables las estimaciones de los recursos disponibles son aún más dispares. Interviene en ello el gran número de suposiciones que deben hacerse. En el caso de la biomasa, la más antigua y más extendida geográficamente, es preciso dar valores a la recogida de cosechas y desechos, a la explotación de bosques, a la llamada agricultura energética y a todos los productos derivados de la madera. Lo mismo ocurre en cuanto a la energía potencialmente derivable de los residuos de todo tipo, industriales, ganaderos, agrícolas, urbanos, etc.

Quizá, sin embargo, la principal variable en estas estimaciones sea la situación de la tecnología susceptible de aplicación que aumenta la utilización de estas energías a partir de los recursos naturales, como puede comprobarse comparando los valores de las reservas a medida que pasa el tiempo.

De los valores dados en las Actas del Congreso Mundial de la Energía de 1992 y 1995 se puede obtener la Tabla-11.

Tabla 10

Consumo mundial anual de energía (1995) y duración estimada de las reservas de energías no renovables*

Combustibles	M Tep	Años
Sólidos	2.210	275 – 1,810
Petróleo	3.227	42,7 – 104 – 291 **
Gas Natural	1.883	57 – 174
Nuclear	596	99 - 326
		4.950 – 16.300 ***
	7.916	

* Según se trate de reservas convencionales y últimas, definidas en la Tabla 9.

** Incluidos todos los recursos

*** En reactores reproductores.

Tabla-11

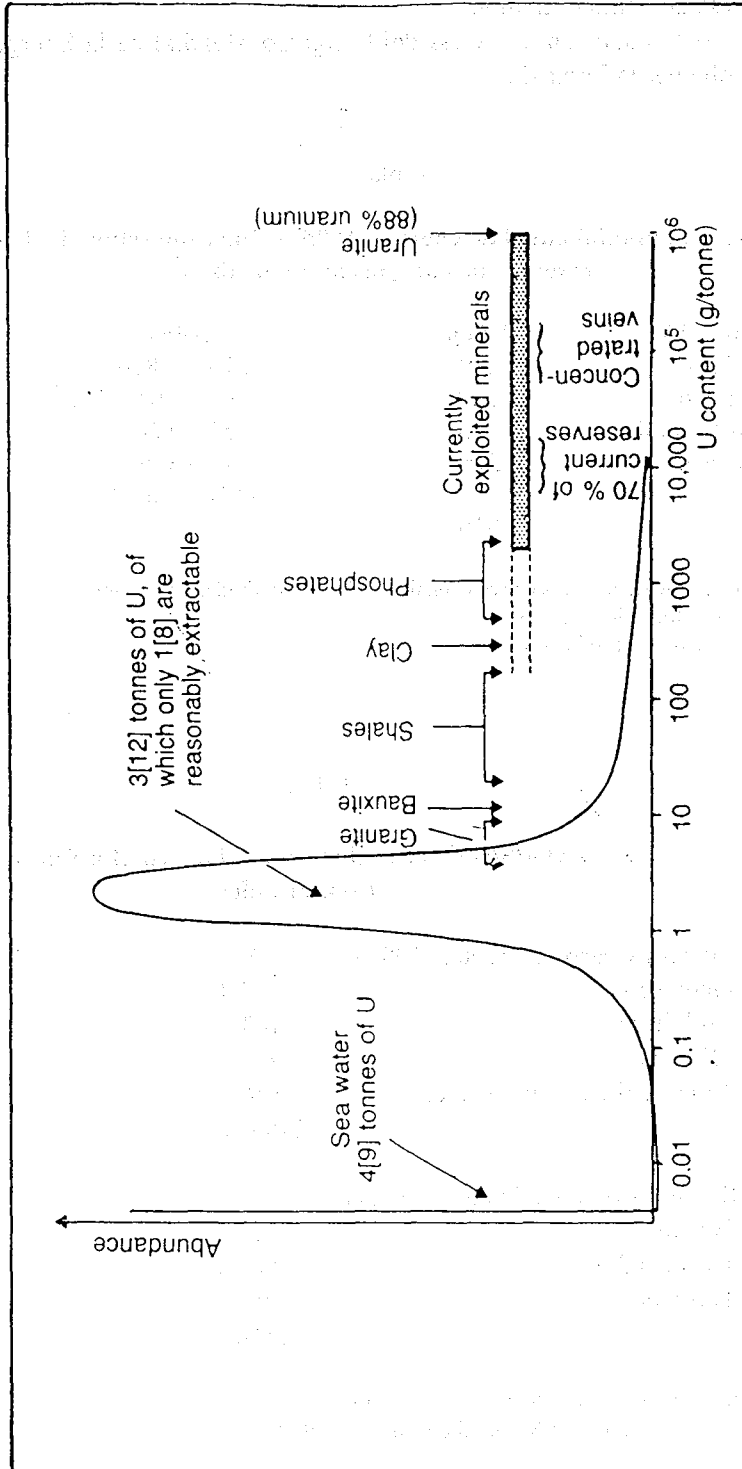
**Recursos de energías renovables en el mundo
M tep anuales.**

* Madera y carbón vegetal (1993)	518
* Geotermia	3,1
** Hidráulica	483
** Biomasa	930
** Solar, eólica, mareas, etc.	<u>146</u>
	2.080,1
* Recursos potenciales de biomasa	
Bosques	845
Cosechados	906
Desechos	<u>467</u>
	2.218

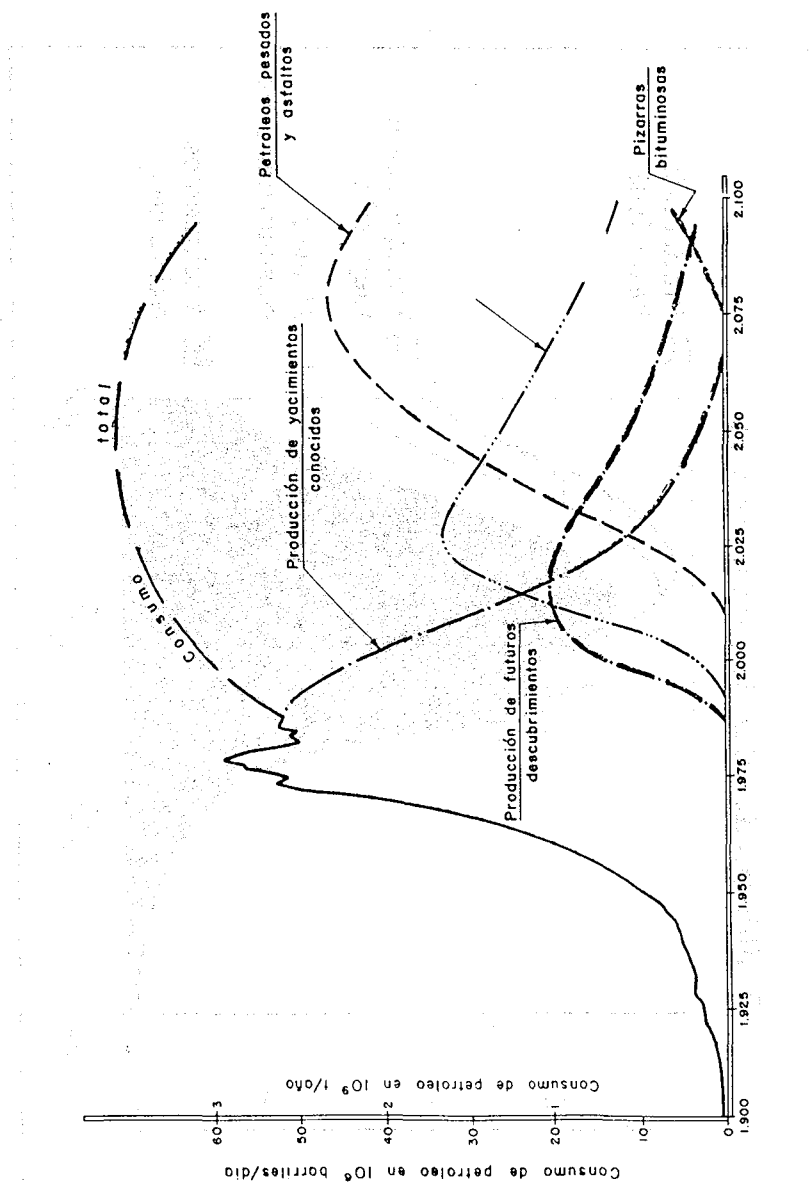
Fuente: * Congreso Mundial de Energía, 1995

** Congreso Mundial de Energía, 1992

Figura 6



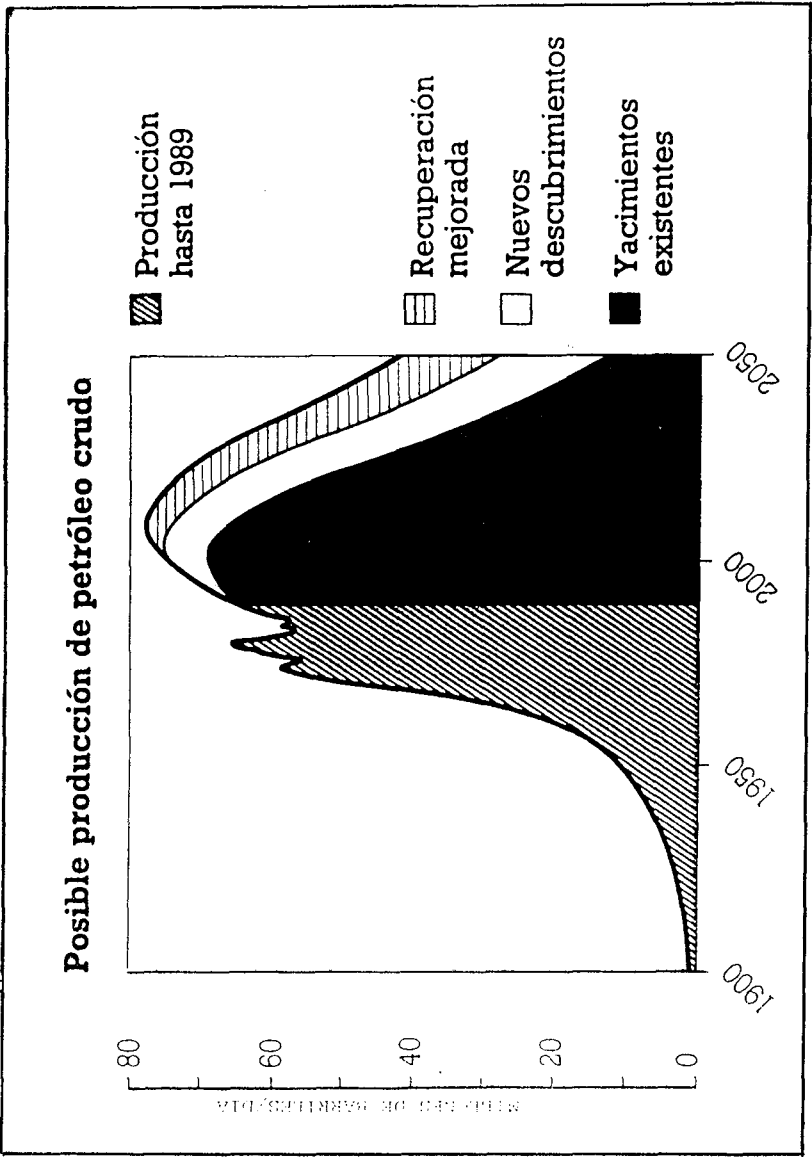
CONSUMOS MUNDIALES DE PETROLEO



Fuente: World Energy Outlook, Chevron, 1987

Figura 7

Figura 8



Bajo el epígrafe de fuentes menores de energía se conocen numerosas fuentes energéticas que suelen tener una importancia reducida a nivel general, pero grande en particular para una industria o sector dados o para un área o zona geográfica determinada.

No considerando las grandes instalaciones hidroeléctricas, algunas de las que hoy se conocen como minicentrales pueden adquirir en el futuro mucha más importancia que en el presente. Tales son las basadas en la biomasa, con especial énfasis en los residuos agrícolas y las que forman parte del reciclado de los residuos sólidos urbanos.

Sin que ello suponga ninguna relación con su categorización u ordenación, la cogeneración en refinerías de petróleo, el aprovechamiento del calor de procesos de alta temperatura (tratamientos de piritas y blendas, gasificación de carbones, gas de coque o de altos hornos, etc.) y el empleo del metano de minas de carbón y granjas, junto con las minicentrales hidráulicas son ejemplos de utilización actual de este tipo de energías.

Como ejemplo de la amplia divergencia de las estimaciones se reproduce aquí, en la Tabla-12, los recursos potenciales estimados por autores franceses. Los datos de tipo genérico sobre potencia de energía solar, geotérmica, de las mareas y de las olas concuerdan razonablemente con datos de otros orígenes, pero no así los de la energía eólica.

Faltan en la Tabla los valores correspondientes a las energías hidráulica y derivada de la biomasa.

Una consideración digna de ser subrayada por haber sido causa en el pasado de muchas dificultades a escala mundial es la distribución geográfica de los recursos energéticos. Si bien la Revolución Industrial del siglo XIX comenzó con el uso de los combustibles fósiles sólidos – el carbón en sus diversas formas-, en este final del siglo XX la Revolución científica se basa en el petróleo. A diferencia del carbón, del que hay abundantes reservas distribuidas bastante uniformemente en el mundo, como puede observarse en la Tabla-13, el petróleo está concentrado preferentemente en el Oriente Medio donde están situadas las 2/3 partes de las reservas comerciales. Es bien conocida la situación sociopolítica de esta zona que conduce algunas veces a crisis con repercusión en todo el mundo.

El creciente uso del gas natural, cuya distribución está ya algo menos concentrada en una sola región, tiende a compensar parcialmente, al menos en Europa, una dependencia excesivamente alta del petróleo que se puso de manifiesto con motivo de la crisis de 1973 en que se elevó drásticamente el precio del crudo.

El toque de atención que ello supuso inició el desarrollo rápido de la energía nuclear para producir electricidad, lo que atenuó el impacto parcialmente, ya que sigue y seguirá en un futuro próximo la dependencia del petróleo para el transporte. El Uranio, base de la energía nuclear, la energía hidráulica y la biomasa contribuyen en general a favorecer la diversificación de las fuentes energéticas y a mantener un equilibrio razonable entre ellas de modo que puedan amortiguarse cambios o interrupciones bruscas en los suministros.

Tabla 12

RESSOURCES POTENTIELLES DES ENERGIES RENOUVELABLES

SOLEIL DIRECT

Puissance d'origine solaire arrivant sur terre	$1,7 \cdot 10^{17}$ W
Puissance reçue au-dessus de l'atmosphère terrestre	1,4 kW/m ²
Puissance reçue au niveau du sol	1 kW/m ²
Durée annuelle d'ensoleillement (monde)	1 000 à 4 000 h/an
Durée annuelle d'ensoleillement (France)	1 750 à 3 000 h/an
Energie reçue par m ² de surface horizontale (France)	1 100 à 1 900 kWh/m ² /an
Energie annuelle reçue sur l'ensemble du territoire français	700 000 TWh

ENERGIE EOLIENNE

Gisement mondial	12 TWe
dont France	12 000 MWe
Productivité moyenne mondiale	100 000 TWh/an
dont France	100 TWh/an

GÉOTHERMIE

Puissance géothermique de la terre	22 TW
Flux géothermique	0,05 to 0,1 W/m ²
Gradient géothermique	3,3°C/100m
Gisement français (basse énergie t < 100°C)	6 Mtep/an

ENERGIE DES MERS

Puissance des marées	3 TWe
Gisement mondial	100 à 300 GWe
Puissance installée en France - Usine de la Rance	250 MWe

ENERGIE DES VAGUES

Puissance par mètre de vague	
Golfe de Gascogne	30 kW/m
Côtes britanniques	50 kW/m

ENERGIE THERMIQUE DES MERS (Energie Solaire)

Gisement mondial	10 TWe
------------------------	--------

Tabla 13

Distribución geográfica de las reservas de combustibles no renovables.

CARBON	%	PETROLEO	%	GAS NATURAL	%
--------	---	----------	---	-------------	---

Asia y Oceanía	31,6	Oriente Medio (Arabia Saudita)	64,5 (25,8)	Rusia (CEI-ECO)	40,1
América Norte	23,4			Oriente Medio	32,4
Rusia (CEI-ECO)	22,2	América Norte	8,5	Africa	6,7
Europa	13,9	Iberoamérica	8,2	Asia y Oceanía	6,7
Oriente Próximo		Africa	7,1	América Norte	6,0
Y Africa	7,9	Rusia (CEI-ECO)	5,6	Iberoamérica	4,1
		Asia y Oceanía	4,4	Europa	4,0
Iberoamérica	1,0	Europa	1,7		

*URANIO	%	HIDRAULICA	%	**BIOMASA	%
---------	---	------------	---	-----------	---

Australia	28,0	Iberoamérica	30,2	Asia	35,0
Kazakstán	19,4	Asia y Oceanía	26,7	América Norte	18,2
Canadá	11,9				
Africa del Sur	9,0	América Norte	17,0	Europa	12,9
Brasil	7,2	Europa	15,8	Rusia (CEI-ECO)	10,8
Namibia	7,1	Rusia (CEI-ECO)	5,8	América del Sur	9,5
Estados Unidos	5,0			Africa	9,0
Mongolia	2,7	Africa y M. Oriente	4,5	América Central	2,7
Níger	2,5			Oceanía	1,9
Ucrania	1,9				
Argelia	1,2				
Francia	0,7				
Gabón	0,4				
España	0,4				
Otros	2,6				

* OIEA/AEN-OCDE 1995

** Congreso Mundial de la Energía 92

Congreso Mundial de la Energía 1995

BP Statistical Review 96

La demanda mundial de energía

En la actualidad, con independencia de los recursos de las energías renovables, nuestra sociedad basa la satisfacción de sus necesidades energéticas en los combustibles fósiles, en la energía nuclear, en la energía hidráulica y en la biomasa, pero de todos el de mayor importancia por la variedad de aplicaciones que ha encontrado es el petróleo.

Datos del año 1990 aparecen en la figura-9. Junto al consumo global en el mundo se presenta su distribución entre las diversas fuentes energéticas, incluida la biomasa y la hidráulica, con el orden: Petróleo (30%), Carbón (24%), Gas natural (19%), Biomasa (13%), Nuclear (5%) e Hidráulica (6%).

Esta figura detalla también algunos de los problemas más importantes que afectan al consumo global de energía: la población y la distribución de la energía entre países.

Las cifras son importantes y dignas de meditación. Los países industrializados con una población de 1.300 millones de habitantes, es decir, el 25% del total consumen el 67% de la energía global del Mundo. Por el contrario, los países en desarrollo, es decir, los restantes 4.200 millones de habitantes que constituyen el 75% de la población mundial consumen solamente el 33% de la energía.

Estos datos deben hacer reflexionar sobre su repercusión en el resto de los problemas que plantea el consumo de energía. Volveremos más adelante sobre ello.

Un exámen más detenido del consumo energético en el mundo nos permite confirmar las diferencias cuantitativas entre los países industrializados y los países en desarrollo y comprobar también las diferencias cualitativas, la utilización de unos y otros de una composición distinta de la mezcla de tipos de energía que emplean, lo que suele designarse con la palabra inglesa "mix".

En la Tabla-14 se presentan los consumos de energías primarias carbón, petróleo, gas, energía hidráulica y energía nuclear en las diversas áreas geográficas (continentes y países, según el caso).

Destaquemos algunos casos. El mayor consumo se da en América del Norte, Asia y Australia, y Europa, seguidas ya de lejos por la antigua Unión Soviética y todavía más de Iberoamérica, Oriente Medio y Africa.

En todos los continentes el mayor consumo corresponde al petróleo, con dos únicas excepciones: China, en el que el mayor consumo corresponde al carbón y el de la antigua Unión Soviética, en que se trata del gas natural.

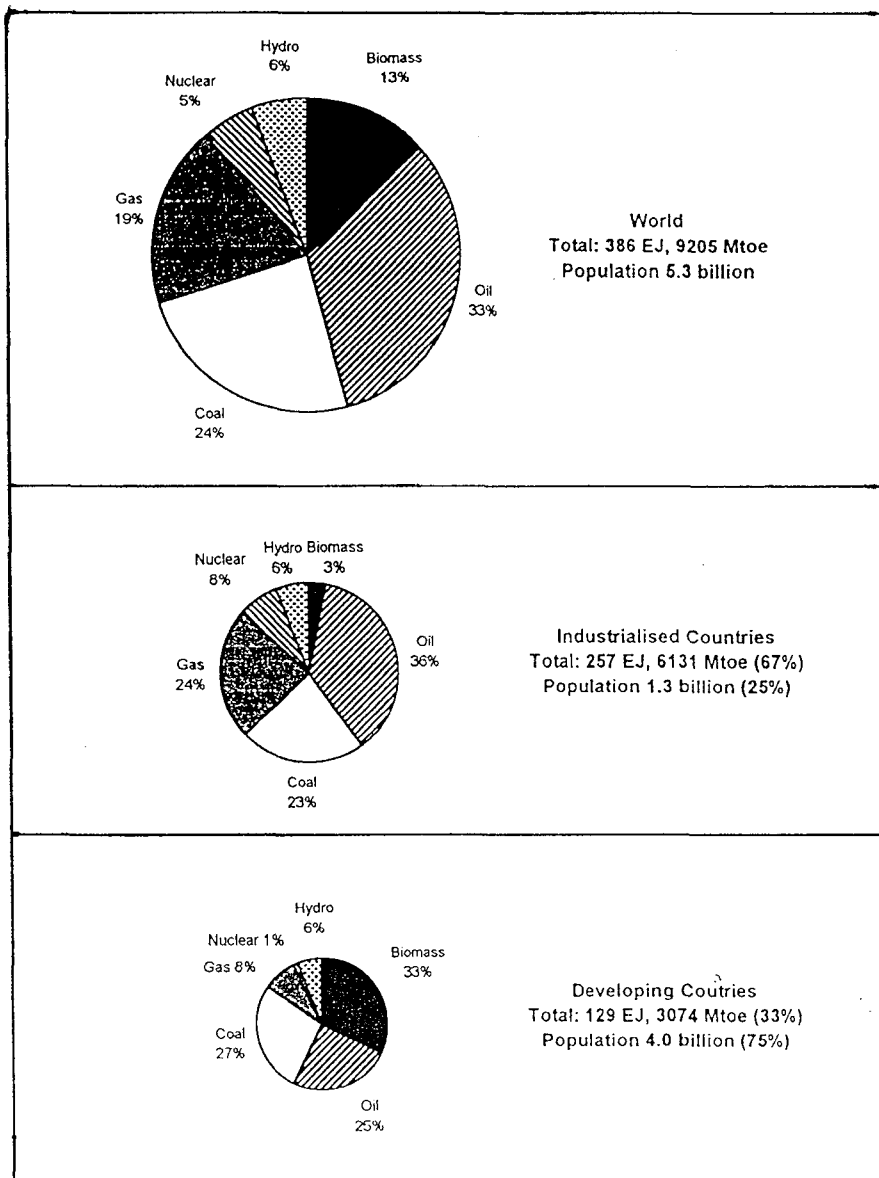
Como es lógico, el consumo de energía nuclear para usos pacíficos depende del número de centrales nucleares en funcionamiento. Es Europa el primero de los continentes en ese sentido, aún sin incluir las centrales de la antigua Unión Soviética que están todas en la zona europea de ésta. Le sigue Estados Unidos y después figura Asia, en su mayoría Japón. Es en esta zona del mundo donde el ritmo de construcción de centrales nucleares es más alto.

En cuanto a la energía hidráulica su utilización es relativamente semejante en América del Norte, Iberoamérica, Europa y Asia.

Otra comparación interesante es el estudio de la variación del consumo en las diversas zonas geopolíticas durante los años transcurridos desde 1985 a 1995, tal como aparece en la Tabla-15.

Figura 9

World Primary Energy Consumption 1990 (House and Hall, in preparation; based on Scurlock and Hall, 1989)



Industrialised countries: BP Statistical Review of World Energy 1990, British Petroleum PLC, UK.
(industrialised countries = all OECD countries plus E. Europe and ex-USSR).
Developing countries: 1990 UN Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York, 1992.
Biomass: 1987 data from the Biomass Users Network (BUN) (Rosillo-Calle & Hall, 1991)
Nuclear and hydro converted on basis of oil equivalent to produce same amount of electricity.

Tabla 14

CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE COMMERCIALE DANS LE MONDE
en 1995 (par source)
Mtep

	CHARBON	PETROLE	GAZ NATUREL	HYDRAULIQUE (*)	NUCLEAIRE (**)	TOTAL
AMERIQUE DU NORD	523,7	958,4	654,2	56,4	210,2	2 402,9
AMERIQUE LATINE	17,9	193,8	70,3	40,1	2,6	324,5
EUROPE	383,0	725,6	339,1	47,9	229,2	1 725,2
Ex - U.R.S.S.	191,7	214,7	470,1	21,4	45,2	943,1
MOYEN-ORIENT	5,6	186,5	118,4	1,2	—	311,7
AFRIQUE	87,8	102,7	37,9	6,3	3,1	237,6
ASIE et AUSTRALASIE	1 001,0	845,2	193,6	45,2	106,1	2 190,0
dont :						
CHINE	640,3	157,5	15,8	16,2	3,3	883,1
JAPON	85,9	267,3	55,0	7,7	74,3	490,2
MONDE Mtep	2 210,7	3 226,9	1 883,6	218,5	596,4	8 135,8
%	27,2	39,7	23,1	2,7	7,3	100,0

(*) 1kWh <=> 0,086 tep

(**) 1kWh <=> 0,25 tep

SOURCE : BP Statistical Review 96

Se observa inmediatamente que se pueden diferenciar varios grupos según el ritmo de aumento de consumo. No se incluirá en esta clasificación a los países de la antigua Unión Soviética en que por razones bien conocidas el consumo disminuyó espectacularmente. Un grupo formado por Europa y América del Norte con crecimientos en estos 10 años del 4,0 y 16,2%, respectivamente. Un grupo intermedio, África con un 23%, Japón con un 26%, Iberoamérica con un 28,4% y un tercero, de rápido crecimiento (China, 34,4% y Oriente Medio, 34,9%), en el que también se incluirían el resto de los países de Asia y Australia aparte de Japón y China.

Las razones para estas diferencias son variadas y distintas. Además del aumento de la población, mucho más acentuado en Asia, África e Iberoamérica, partir de una base más baja deforma la comparación. En los países industrializados el aumento porcentual es menor, ya que desde 1973 se ha tratado de aumentar la eficiencia energética, sobre todo en la industria. Sin embargo, en todos ellos, como se vio en los casos de Alemania y Estados Unidos (figuras 3 y 4), aunque el consumo de energía primaria se haya mantenido constante o con aumentos bajos, ha continuado el crecimiento de electricidad.

Otras razones para el incremento de la demanda son el gran aumento de los parques automovilísticos y de camiones, del transporte aéreo y del creciente uso de los trenes ultrarrápidos. El consumo doméstico se incrementa continuamente por la creciente utilización del aire acondicionado y de la calefacción central, así como de todo tipo de electrodomésticos. Ha cambiado la forma de vivir de nuestra sociedad y esta nueva forma requiere un mayor consumo de energía.

En los principales países industrializados, a partir del año 1973 la demanda de energía primaria por unidad de Producto Interior Bruto ha disminuido progresivamente con el tiempo. Es una demostración del aumento de productividad como resultado de la mejora de los procesos desde el punto de vista energético. Véase en la figura-10 el caso de Estados Unidos, Alemania (en muchos de los años estudiados, Alemania Occidental) y Japón, que han pasado de un valor 100 en 1973 a 83, 79 y 70, respectivamente en 1995.

La energía primaria empleada en los hogares por unidad de Producto Interior Bruto ha permanecido, por el contrario, prácticamente constante en los Estados Unidos y Japón, habiendo pasado por un máximo en el caso de Alemania Occidental. En la figura 11 se demuestran estas variaciones, haciendo caso omiso de los años anteriores a 1973 en que Japón y Alemania estaban aún en la fase de recuperación tras la pérdida de la Segunda Guerra Mundial.

El nivel de vida más elevado obtenido en los últimos 25 años se caracteriza por un aumento del confort de las viviendas, por la mayor movilidad en relación con el trabajo y el turismo y por las restantes actividades o atenciones que proporciona o ha hecho posible el estado del bienestar. En las figuras 12 y 13 se dan como ejemplos que pueden ser considerados como representativos el crecimiento de los hogares con calefacción central en los Estados Unidos, Escandinavia, Europa y Japón y el número de coches por 100.000 personas en Estados Unidos, Alemania y Japón por un lado y Polonia y la Unión Soviética por otro. De 1970 a 1993 este número ha pasado de 407 a 595 en Estados Unidos, de 229 a 490 en Alemania, de 88 a 335 en Japón, de 15 a 190 en Polonia y de 11 a 68 en la antigua Unión Soviética.

Tabla 15

CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE COMMERCIALE
PAR ZONE GEOPOLITIQUE
Mtep (*)

	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995
AMERIQUE DU NORD	2 013,1	2 231,8	2 230,4	2 266,2	2 311,2	2 369,9	2 402,9
AMERIQUE LATINE	232,4	270,1	276,7	285,2	296,2	308,4	324,5
EUROPE	1 656,2	1 739,3	1 728,7	1 705,2	1 702,7	1 691,7	1 725,2
Ex - U R S S	1 290,2	1 399,3	1 349,2	1 247,9	1 118,8	1 002,8	943,1
MOYEN-ORIENT	202,9	253,4	258,5	273,5	285,9	302,7	311,7
AFRIQUE	181,9	212,3	212,1	213,3	218,7	227,2	237,6
ASIE et AUSTRALASIE	1 372,4	1 748,7	1 805,9	1 885,3	1 963,1	2 087,7	2 190,8
dont							
CHINE	546,2	668,0	677,0	703,7	738,2	795,0	833,1
JAPON	362,7	428,3	443,2	450,8	455,7	478,2	490,2
MONDE	6 949,1	7 855,2	7 861,5	7 876,6	7 896,6	7 990,4	8 135,8

(*) Hydraulique 1 kWh <=> 0,086 tep
Nucéaire 1 kWh <=> 0,26 tep

SOURCE BP Statistical Review 96

Demand for Primary Energy Services in Manufacturing,
normalized to 1973.

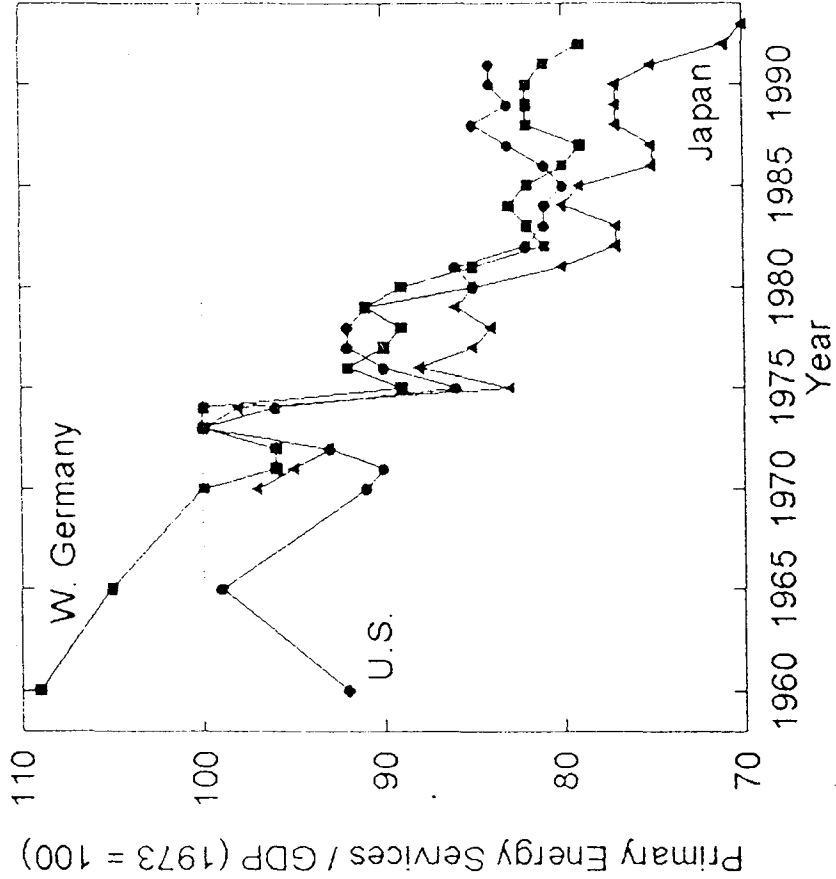


Figura 10

Figura 11

Demand for Primary Energy Services for Households,
normalized to 1973.

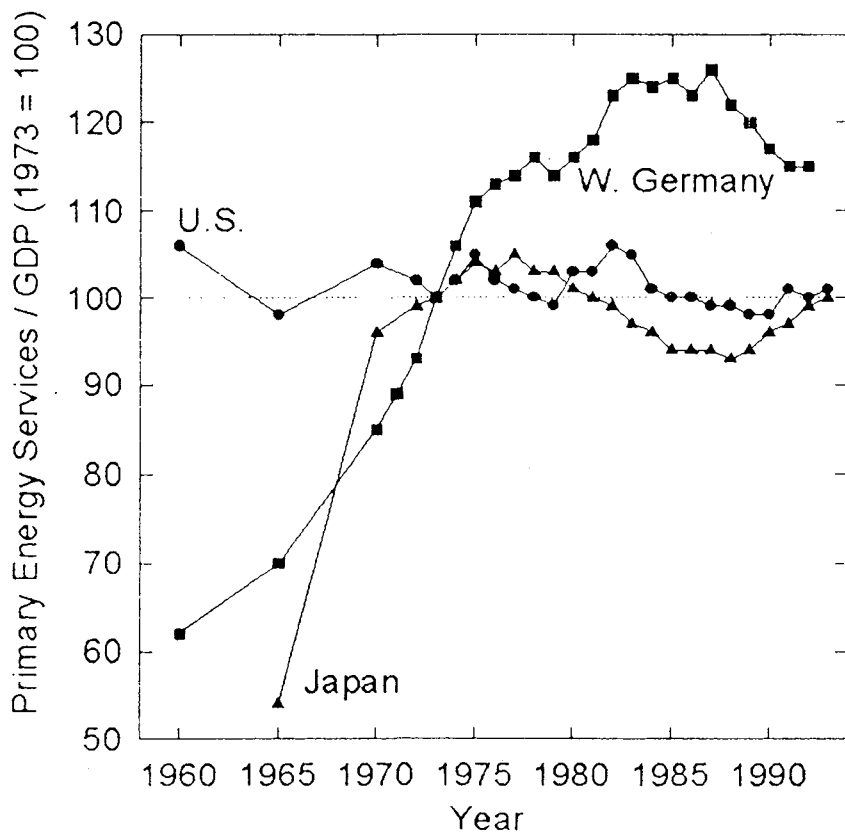


Figura 12

The Rise of Central Heating.

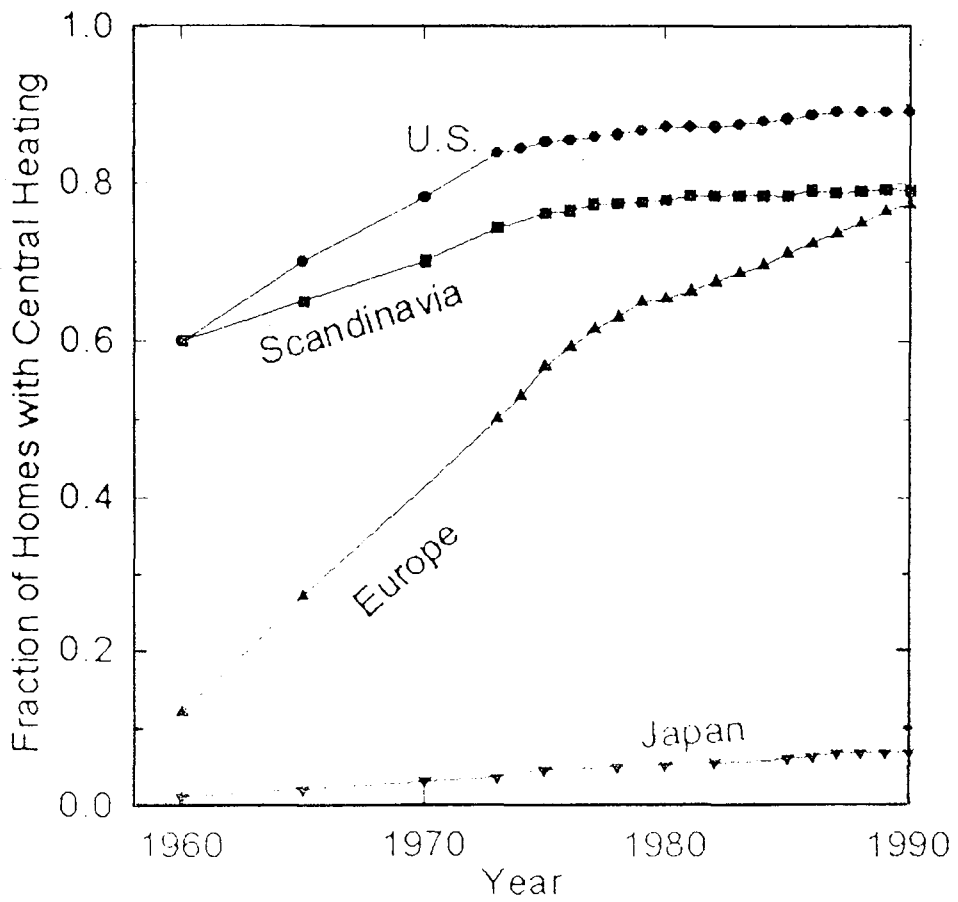
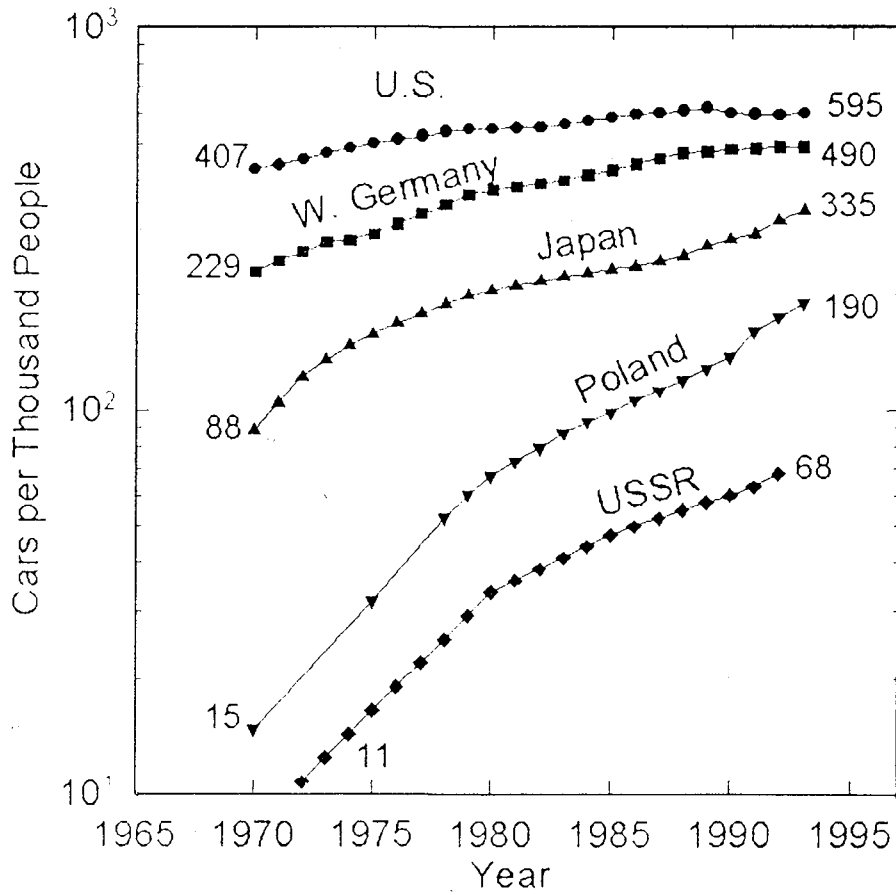


Figura 13

The Growth of Car Populations.



Situación energética de España.

Hasta ahora hemos contemplado la situación energética del mundo, sus reservas y su distribución, la energía que se recibe directa o indirectamente del Sol y del calor terrestre y hemos evaluado la energía que se consume por tipos de fuentes energéticas y por áreas geográficas.

Parece ahora oportuno comprobar cuál es la situación de España a este respecto, las reservas de que dispone y lo que se consume de los diversos tipos. Esto permitirá deducir algunas conclusiones que como las grandes pinceladas de un cuadro permita obtener una idea bastante aproximada del retrato, es decir, de la situación actual.

España es un país pobre en cuanto a sus recursos energéticos. En la Tabla-16 se detallan expresando como millones de toneladas equivalentes de petróleo las reservas de carbón, petróleo, gas natural y Uranio existentes en nuestro país, que alcanzan a 1.357 millones de toneladas equivalentes de petróleo. De ellas, 693 son de carbón y 650 de Uranio, por lo que estos dos combustibles representan el 99% de nuestras reservas de combustibles. Prácticamente puede decirse que no disponemos de petróleo ni de gas natural y que todo lo que consumimos de estos dos combustibles hay que importarlo.

Tabla-16

Recursos energéticos en España, M tep Combustibles no renovables

1. Carbón	
Hulla y antracita	469
Lignito negro	133
Lignito pardo	<u>191</u>
	693
2. Petróleo	3,4
3. Gas natural	10,7
4. Uranio (65.000 ton)*	<u>650</u>
	1.357,1

* En reactores de agua ligera 1 t de Uranio es equivalente a 10.000 tep.

Es evidente que además debemos contar con las energías renovables, de las cuales las que tienen en la actualidad una participación mayor son la biomasa y la energía hidráulica. Veamos, no obstante, antes el consumo energético de nuestro país en 1995 y 1996, que se da en la Tabla-17.

Tabla-17

**Consumo energético de España
En 1995 y 1996, M tep.**

	<u>1995</u>	<u>1996</u>
Carbón	18,72	15,62
Petróleo	55,30	56,18
Gas natural	7,50	8,40
Energía nuclear	14,45	14,68
Energía hidráulica	2,00	3,55
Saldo	<u>0,39</u>	<u>0,09</u>
Total	98,36	98,52

A estas cifras deben agregarse las de las diversas energías renovables, que se dan en la Tabla-18, para los mismos años 1995 y 1996.

Tabla-18

**Producción de Energías Renovables
En 1995 y 1996, M tep.**

	<u>1995</u>	<u>1996</u>
Biomasa	3,576	3,597
Minihidráulica	0,197	0,329
Solar térmica	0,025	0,025
Solar fotovoltaica	0,001	0,001
Residuos Sólidos Urbanos	0,122	0,211
Eólica	0,016	0,027
Geotérmica	<u>0,003</u>	<u>0,003</u>
	3,940	4,193

Antes de comentar las cifras de estas tres últimas tablas, veamos la comparación entre los años 1973, 1985 y los más cercanos 1990, 1995 y 1996. En la Tabla-19 se presentan, en tantos por ciento, los consumos de combustible en los citados años.

Tabla-19

	<u>1973</u>	<u>1985</u>	<u>1990</u>	<u>1995</u>	<u>1996</u>
Carbón	18,2	27,0	21,6	19,0	15,9
Petróleo	72,9	55,9	54,2	56,2	57,0
Gas natural	1,5	3,1	5,7	7,6	8,5
Energía nuclear	3,5	10,3	16,1	14,7	14,9
Energía hidráulica	4,6	3,8	2,5	2,1	3,6
Saldo	<u>-0,3</u>	<u>-0,1</u>	<u>-0,1</u>	<u>+0,4</u>	<u>+0,1</u>
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Otra particularidad importante debe ser el conocimiento de la parte del consumo que procede de nuestros propios recursos, distinguiéndolo de lo que debe ser importado. Esto se da en la Tabla-20 para 1995 y 1996, donde se presentan tanto los consumos de producción propia como los porcentajes de esa producción frente al consumo de cada combustible.

Tabla-20

Producción propia en 1995 y 1996
Tep y %

	1995		1996	
Carbón	9,7	(52,4)	9,50	(61,7)
Petróleo	0,65	(1,2)	0,52	(0,9)
Gas natural	0,54	(7,2)	0,41	(4,9)
Energía nuclear	14,45	(100,0)	14,68	(100,0)
Energía hidráulica	1,98	(100,0)	3,50	(100,0)
Resto	0,22	(100,0)	0,27	(100,0)

Si se tienen en cuenta los consumos actuales que pueden evaluarse en números redondos en unos 100 Mtep anuales, se puede inmediatamente comprobar que todas las reservas españolas servirían solamente para unos 14 años, además de las aportaciones de las energías renovables que son del orden del 4 ó 5%, además de la energía hidráulica convencional.

Para confirmar aún más la pobreza de nuestros recursos basta simplemente comprobar que la energía nuclear es la que aporta la mayor parte de nuestra producción propia, 52,46% y 50,83%, respectivamente, en 1995 y 1996, seguida del carbón con el 35,22% y el 32,89%. La energía hidráulica, muy variable en nuestro país por depender de las variaciones climáticas, es el tercer contribuyente muy lejos de los otros dos. La biomasa, muy usada, pero de difícil evaluación, ofrece valores del mismo orden que la hidráulica convencional y quizá sea superior si se consideran las dificultades de su medida y comprobación, como es su consumo en la España rural.

Las cifras oficiales del empleo de la biomasa se dan en la Tabla-21.

Tabla-21

**Consumo de biomasa por sectores
1995, k tep**

Doméstico	2.102
Fabricación de pasta de papel	707
Industria de la madera y corcho	326
Alimentos, bebidas y tabaco	413
Cerámicas, cementos y yesos	127
Productos químicos	18
Otras actividades	<u>114</u>
	3.807

En la Tabla-19 pueden comprobarse los cambios en el énfasis puesto por los sucesivos planes energéticos en los diversos combustibles. Junto con el desarrollo de la energía hidráulica hasta 1973 y aún después (véase 1985) se impulsó la utilización del carbón para la generación de electricidad, con la finalidad de resolver el problema que el crecimiento económico y la sequía habían provocado y para cuya resolución se contó también con la energía nuclear.

Así se consiguió reducir la intensa dependencia del petróleo hasta entonces que había sido ayudada por los bajos precios de los crudos, circunstancia esta que continua siendo un factor importante en el desarrollo de las fuentes alternativas, ya que después de las crisis de 1973, 1979 y 1981 el precio del crudo ha vuelto a caer a niveles semejantes a los anteriores a 1973, como puede comprobarse en la figura 14.

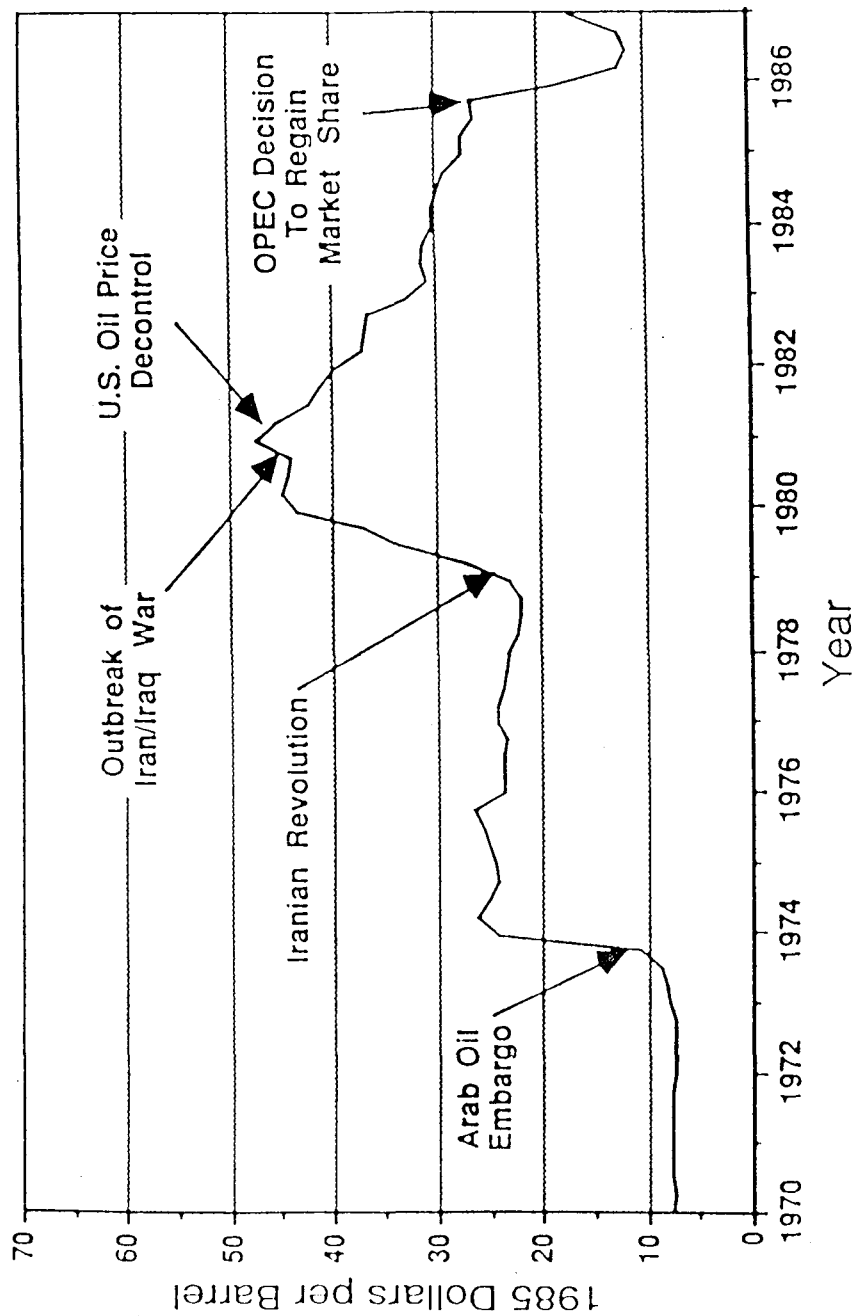
Sin embargo, el esfuerzo hacia la independencia energética ha adquirido menos importancia en los últimos años, por lo que en breve la suma del consumo de petróleo y de gas natural volverá a niveles anteriores a 1973, una vez que se concluyan las redes interiores de distribución de gas y se consuman los volúmenes anuales contratados con Argelia.

El aumento en el consumo de las energías renovables se ve así frenado por sus costes más elevados y sólo otras consideraciones y medidas políticas complementarias podrán ayudar a su aumento futuro. En el caso de la energía nuclear la errónea opinión pública sobre sus riesgos ofrece pocas esperanzas en un futuro próximo, a pesar de que, junto con las renovables, es la única forma de reducir el efecto invernadero.

Efectos sobre el ambiente.

Todas las transformaciones energéticas tienen un impacto ambiental. Mínimo en algunos casos, mayor en otros y notable en muchos. Las transformaciones reales no son nunca reversibles y todas ellas, en su paso de unas a otras, acaban finalmente en calor. Si en la transformación el calor aparece como etapa intermedia, una parte importante, debe pasar necesariamente a un sumidero de calor. Y en cualquiera de las transformaciones siempre aparece el calor como energía residual no aprovechable.

Figura 14



Oil shocks since 1973. The graph shows the price of oil expressed in constant 1985 dollars as a function of time.

Es evidente que las energías nobles ofrecen rendimientos más elevados que las energías degradadas desde un punto de vista teórico. Pero, en la práctica, hay que contar además con el aparato o equipo donde se hace la transformación.

En muchos casos, el efecto sobre el ambiente es solamente el que produce este calor final absorbido por el medio, pero en otros, la generación del nuevo tipo de energía va acompañado de la producción de residuos materiales, que por su naturaleza físico-química, interaccionan con los componentes del medio al que se incorporan. Por ello, el impacto consiste normalmente en absorción de calor, interacción con los productos de la transformación y presencia y funcionamiento del equipo y aparatos en que la transformación tiene lugar.

Los efectos de la incorporación del calor al ambiente suelen tener poca importancia, excepto en áreas puntuales en que hay una gran concentración de energía, lo que puede dar lugar a variaciones locales del clima.

Por el contrario, la entrada en la biosfera de muchas de las sustancias que se producen como residuos o subproductos de la generación o transformación de la energía tiene una importancia considerable e influye no sólo desde un punto de vista físicoquímico sino también social, económico y de opinión pública.

Estas influencias son muy variables en intensidad y en la zona en que inciden o en la forma de actuación y suelen ser la causa de los efectos no por secundarios menos importantes de tipo socioeconómico.

De los componentes físicos de la biosfera -atmósfera, océanos, mares, lagos, ríos y la corteza terrestre- la más sensible a la recepción de productos extraños es la atmósfera y de los medios acuáticos, los ríos y lagos tienen menor inercia a los cambios de cualquier tipo motivados por agentes exteriores. En los medios acuático y terrestre adquieren también importancia los efectos directos e indirectos sobre la fauna y la flora.

Como es bien conocido, los efectos más importantes son los debidos a los combustibles sólidos y nucleares y en menor proporción a las energías renovables, aunque ninguna de ellas está exenta de impactos negativos cuando se tienen en cuenta todos los efectos y todas las actividades incluidas en la obtención y preparación de los combustibles, en la construcción y funcionamiento de los equipos necesarios y en las emisiones, vertidos y subproductos y residuos generados.

Consideremos separadamente estos efectos según la fuente energética.

La combustión de los combustibles fósiles, como resultado de componentes presentes en ellos, además del dióxido de carbono y del agua originados por el Carbono y el Hidrógeno presentes como principales contribuyentes, produce cantidades importantes de óxidos de Azufre, SO_2 y SO_3 y de óxidos de Nitrógeno, conocidos bajo la denominación de NO_x . En la combustión del carbón y del petróleo hay también emisiones de partículas sólidas y en la del petróleo hidrocarburos volátiles y amoniaco. En el gas natural además de los escapes de su componente mayoritario, metano, y de los hidrocarburos que le acompañan, hay también presentes entre los productos de la combustión SO_2 y NO_x .

Previamente a su combustión, en la minería del carbón se producen efectos notables sobre la atmósfera, sobre las aguas superficiales y subalveas y sobre el terreno. Tales son entre otras las nubes de polvo, los efluentes ácidos de las minas, las aguas de lavado de carbón, la contaminación del agua de lluvia por su paso a través de las escombreras, las alteraciones de grandes extensiones de terreno, el impacto visual, el ruido en las minas de superficie por los barrenos y los transportes.

Los residuos de la combustión de carbón —cenizas y escorias— plantean problemas de contaminación del aire —arrastre por el viento— y del agua—lixiviación por el agua de lluvia— y son tanto más importantes cuanto menor es el contenido en Carbono del carbón original.

Las perforaciones en campos petrolíferos ocasionan también grandes transformaciones del terreno, tanto para las torres como para las conducciones de los oleoductos. Los lodos de perforación y los vertidos contaminan los suelos y además del impacto visual, aparecen también los malos olores, las antorchas, las explosiones y los incendios.

Los campos de gas ofrecen perspectivas semejantes a las del petróleo, con un potencial mayor de fugas.

Durante su funcionamiento, las centrales nucleares dan lugar a emisiones gaseosas y líquidas que contienen, en condiciones normales, cantidades de radiactividad relativamente pequeñas y al igual que las centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles, las torres de refrigeración del agua caliente pueden crear microclimas locales y siempre tienen un efecto visual apreciable. En las explotaciones mineras de Uranio se producen fenómenos de impacto ambiental semejantes a los de otras minas, con la complicación añadida de la presencia en las aguas residuales de Uranio y algunos de sus descendientes.

Especial relieve adquieren los residuos o solidificados consistentes en los combustibles gastados, cuya radiactividad perdura durante miles de años, y los residuos procedentes del funcionamiento, que por su radiactividad requieren su aislamiento durante décadas o algunos siglos. De la misma forma es preciso descontaminar primero y conservar aislados después del desmantelamiento algunos de los componentes de las centrales nucleares durante un tiempo semejante al de los residuos de funcionamiento.

Las energías renovables no están tampoco exentas de impactos sobre el ambiente.

La energía hidráulica provoca cambios notables en el curso de los ríos, anegando tierras de cultivo y transformando un ecosistema fluvial en lacustre, de modo que la flora y, sobre todo la fauna, quedan afectadas. El aterramiento y la presa quedarán para siempre.

La biomasa produce después de su combustión una gran contaminación con emisión de partículas y de productos nocivos. Si se desea tener un balance equilibrado de emisiones de dióxido de carbono es preciso plantar grandes extensiones de tierra para recolectar la biomasa.

La energía eólica produce ruidos, es un peligro para las aves y tiene un gran impacto visual que cambia el paisaje.

La geotermia produce emisiones gaseosas y aguas contaminantes, además de ruido y olores desagradables.

La energía solar requiere también por su baja concentración grandes extensiones de terreno y por la toxicidad de los componentes empleados en la utilización fotovoltaica habrán de tomarse precauciones en su desmantelamiento.

Se ha escrito mucho sobre los efectos que las emisiones, vertidos y residuos sólidos han tenido, tienen y tendrán sobre nuestro ambiente.

Comencemos por la atmósfera.

Es conocido que la atmósfera tiene como principales componentes el Nitrógeno (78,9%), el Oxígeno (20,95%) y agua, en proporción variable. Como componente menor está el dióxido de Carbono con 0,035% en volumen y luego con menores contenidos N_2O , NO y NO_2 , CH_4 , SO_2 y O_3 . Dado el gran peso de la atmósfera, unas $5,6 \times 10^{15}$

toneladas, el peso de los componentes menores es apreciable; cerca de 2 billones de toneladas de dióxido de Carbono, varios millardos de toneladas de metano y óxido nitroso, casi 200 millones de toneladas de ozono y varios millones del resto de los componentes.

A estas cantidades se van agregando las producidas por las emisiones de origen humano que en 1994 por la parte correspondiente al dióxido de Carbono procedente de los procesos energéticos han sido evaluadas por el Consejo Mundial de la Energía en 5,9 Gigatoneladas de Carbono, es decir, 21,6 Gigatoneladas de dióxido de Carbono, lo que equivale a agregar unas 3,8 partes por millón de CO₂ anualmente al actual contenido. Aunque es difícil atribuir las emisiones de CO₂ a las diversas actividades y zonas del mundo, en los países industrializados se pueden distinguir estadísticamente las debidas a las principales actividades emisoras.

Así, en la Unión Europea las emisiones de CO₂ totalizaron 2.929,4 millones de toneladas en 1993, de las que el 32% lo fueron de centrales eléctricas, el 25% del transporte, el 22% de la industria y el 21% de origen doméstico.

Es preciso, sin embargo, considerar que todos los componentes de la atmósfera se encuadran en un estado no estacionario tanto física como químicamente. Conocida es la expresión ciclo para describir los distintos fenómenos que intervienen y fijan el contenido de cada componente en la atmósfera.

La consecuencia puede ser también definida como el tiempo de residencia de cada componente. Es evidente que se trata de una combinación de los flujos máscicos de entrada y salida, así como de la generación o destrucción por procesos químicos. Su valor relativo puede ser indicativo de su influencia sobre los procesos físicos que tengan lugar.

Algunos valores de ciertos componentes se dan en la Tabla-22

Tabla-22

Tiempos de residencia en la atmósfera.

Dióxido de Carbono	7 años
Oxido nitroso	170 “
Metano	10 “
Clorofluocarburos	
CF Cl ₃	80 “
CF ₂ Cl ₂	170 “
Ozono	
En troposfera (10%)	3 meses
En estratosfera	1 día

Las emisiones de CO₂ dependen del contenido en Carbono del combustible. En cambio la energía específica depende también de los restantes elementos que produzcan reacciones endo o exotérmicas, como es el caso del Hidrógeno o de los que generan escorias.

En la Tabla-23, se dan los factores referidos al metano igual a 1 de diversos combustibles, así como los kg de Carbono emitidos por Gigajulio producido.

Tabla-23

Emisión de CO₂ por combustión directa de diversos combustibles

Combustible	Emisión de CO₂, kg C/10⁹J	Relación con metano igual a 1
Metano	13,5	1
Etano	15,5	1,5
Propano	16,3	1,21
Butano	16,8	1,24
Gasolina	18,9	1,40
Gasóleo Diesel	19,7	1,46
Fuelóleo nº 6	20,0	1,48
Carbón bituminoso	23,8	1,73
Carbón sub-bituminoso	25,3	1,87

Se aprecia la gran diferencia entre el metano y otros hidrocarburos, componentes del gas natural, propano y butano, entre 1 y 1,24; gasolina y gasóleo, 1,40 y 1,46 y dos tipos de carbón 1,73 y 1,87.

Como ya se dijo al tratar en términos generales de los efectos ambientales, todas las formas de energía, si se tienen en cuenta todas las actividades que suponen la construcción del equipo necesario, el ciclo del combustible y el funcionamiento, emiten CO₂.

En la figura 15 se presentan los casos prácticos en los valores extremos de emisiones de los más destacados tipos de energía. Puede observarse que en su caso máximo la energía hidráulica roza el valor del mínimo del gas natural y que la energía fotovoltaica parece destacarse por sus elevadas emisiones del resto de las energías renovables y de la energía nuclear, que globalmente tiene emisiones muy bajas.

Para distinguir entre construcción, suministro de combustible y funcionamiento, la figura-16 da los valores de las emisiones de CO₂ para diversos tipos de combustibles y energías, incluyendo la potencia de las instalaciones donde se producen.

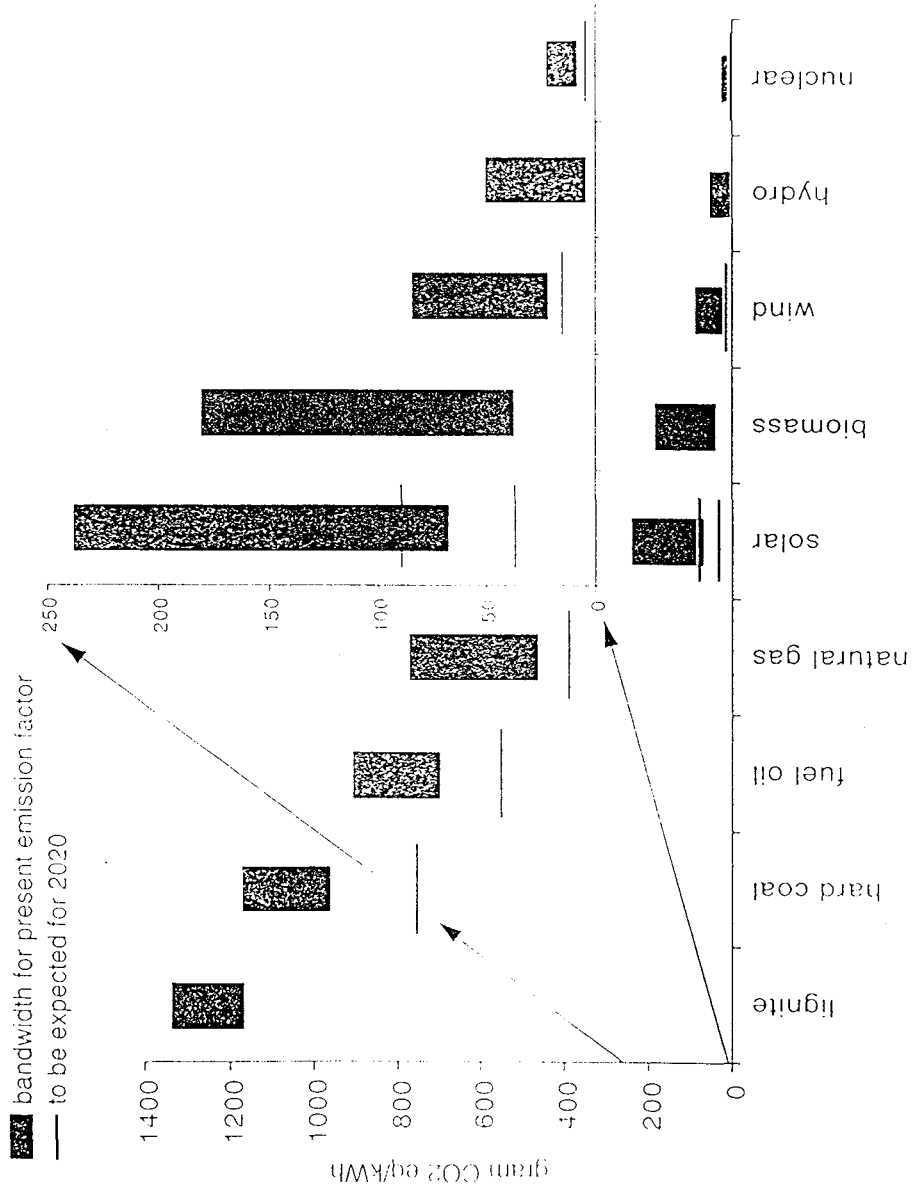
Así, en una central térmica de lignito de 800 MW con purificación del gas, la emisión es de 1,04 kg de CO₂ por kWh producido, mientras que en una instalación de gasificación de lignito de 300 MW la emisión es de 0,91. En análogas centrales de carbón de 700 y 300 MW los valores son, respectivamente, 0,82 y 0,79. Una central de 400 MW quemando gasóleo emite 0,76.

Con gas natural, empleando una turbina de gas de 150 MW se emiten 0,58, con una turbina de vapor de 400 MW, 0,47 y en una instalación de ciclo combinado de 600 MW 0,38.

En todos estos casos el componente principal de las emisiones totales es el funcionamiento de las instalaciones, es decir, la combustión del combustible utilizado y no la construcción.

Figura 15

The total greenhouse gas emission factors of a number of electricity sources



Por el contrario, las energías nuclear y renovables deben sus emisiones principalmente a la construcción y en el caso de energía nuclear una cierta parte al ciclo del combustible.

Aquí también la energía solar fotovoltaica es la que más emite de todas las renovables y asimismo, más que la energía nuclear. Para una instalación de 300 kW situada en Alemania la emisión de CO₂ es de 0,2 kg por kWh y situada en las proximidades del Ecuador 0,1.

Para una central nuclear de 1.300 MW la emisión es e 0,025 y para una minicentral hidráulica fluyente de 20 MW es de 0,004.

Como valor típico de 37 instalaciones eólicas que tienen potencias entre 10 y 3.000 kW aparece el valor de 0,020.

En las centrales térmicas españolas se dan valores bastante semejantes, tal como se indica en la Tabla-24.

Tabla-24

Combustible	Emisión, toneladas CO ₂ /MWh
Lignito pardo	1,16
Lignito negro	1,0
Hulla	0,9
Fuelóleo	0,87
Gas natural (turbina de vapor)	0,56
Gas natural (ciclo combinado)	0,40

Una exposición más completa de las emisiones de las energías renovables, está dada en la figura 17, publicada con motivo de una reunión celebrada en Helsinki en 1991 para estudiar los efectos de la generación de electricidad sobre el ambiente.

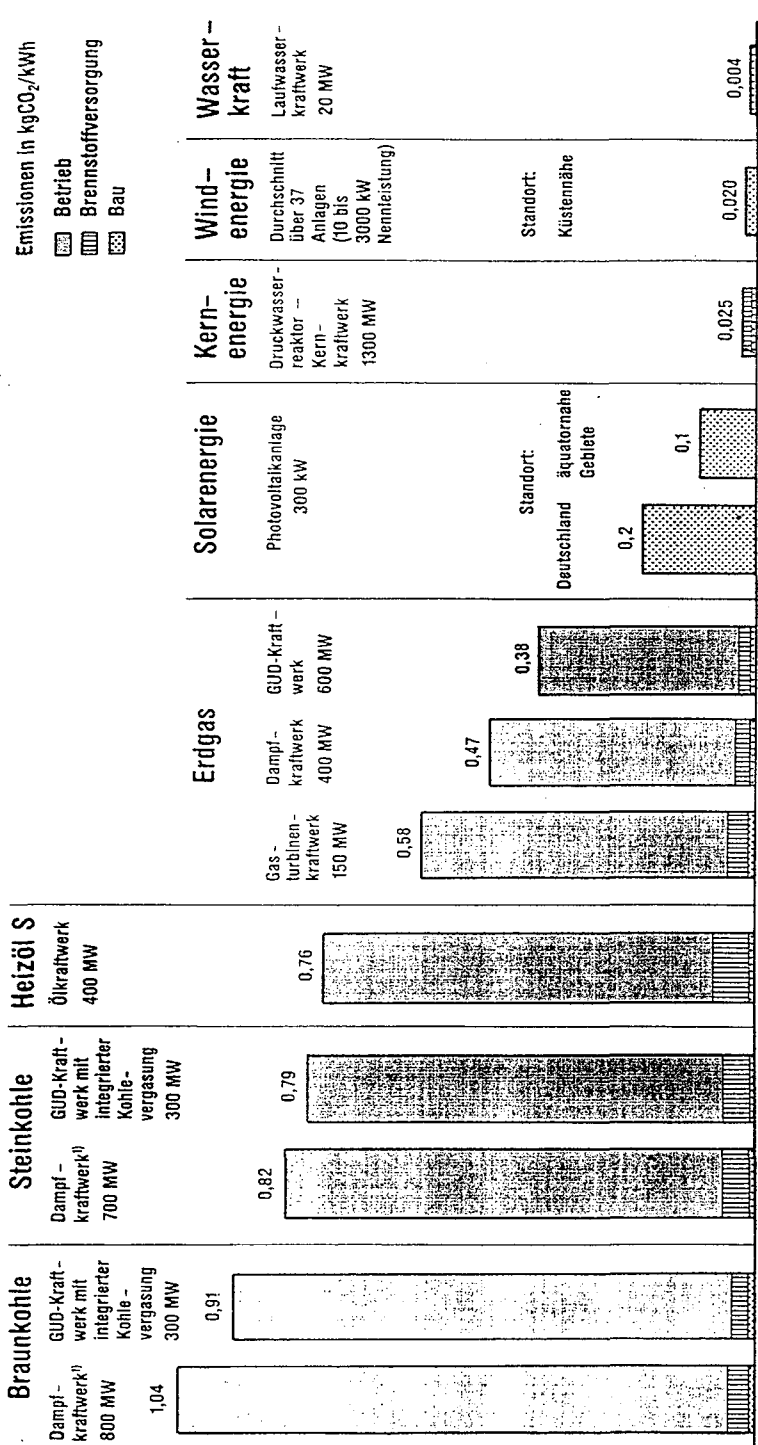
En relación con los datos de las figuras 15 y 16 y de la Tabla-24, se incluye en la figura 17 la obtención de energía a partir de las diferencias de temperatura de los Océanos entre la superficie y las aguas profundas y la energía geotérmica, situadas en el orden citado entre el gas natural y la minihidráulica. La energía térmica solar está situada entre la fotovoltaica y la hidráulica convencional.

La biomasa (madera) con plantación puede dar lugar a una absorción en vez de a una emisión de CO₂.

En una predicción de la banda de variación en el año 2020 de las emisiones totales generadas del efecto invernadero como resultado del empleo de diversas fuentes de electricidad se dan también en la figura 18, las bandas actuales de variación, que, en general, suelen ser razonablemente coincidentes con los presentados anteriormente. Únicamente debiera subrayarse que el orden de mayores a menores emisiones para las energías no basadas en combustibles fósiles es energía solar, biomasa, eólica, hidráulica y nuclear.

En algunas ocasiones se ha señalado que las emisiones del ciclo del Uranio, de la construcción y funcionamiento de la central nuclear y de la gestión de los combustibles gastados producían abundantes emisiones de CO₂ suficientes para igualar las de las centrales térmicas. En el examen pormenorizado de todas las etapas antes indicadas, dado en la figura 19, puede comprobarse que el total sólo alcanza algo menos de los 12 gramos de CO₂ por kWh, en comparación con los del orden de los 1.000 de las centrales térmicas de carbón o los 500 del gas natural.

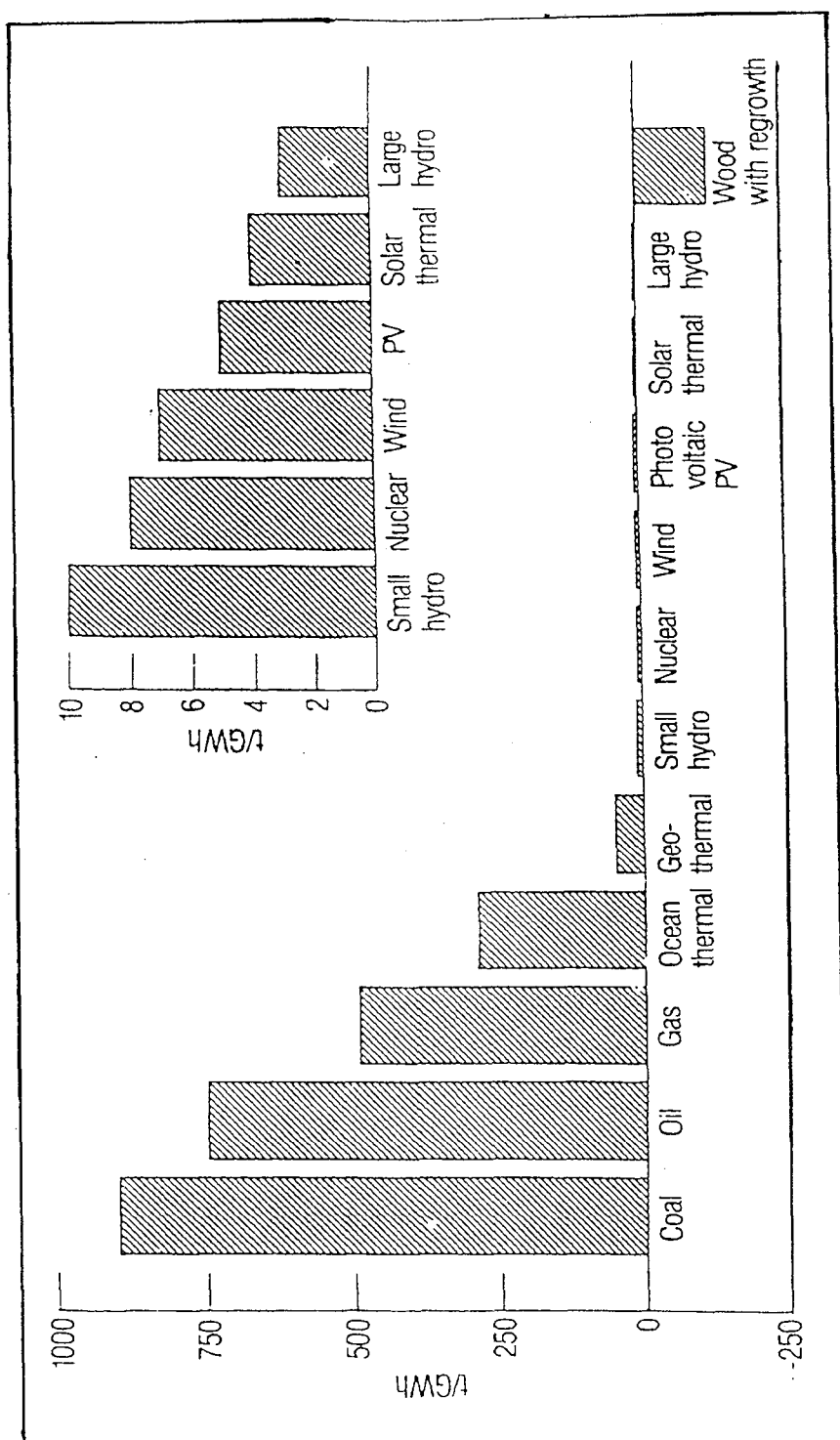
Figura 16



Quelle: Siemens/KWU.

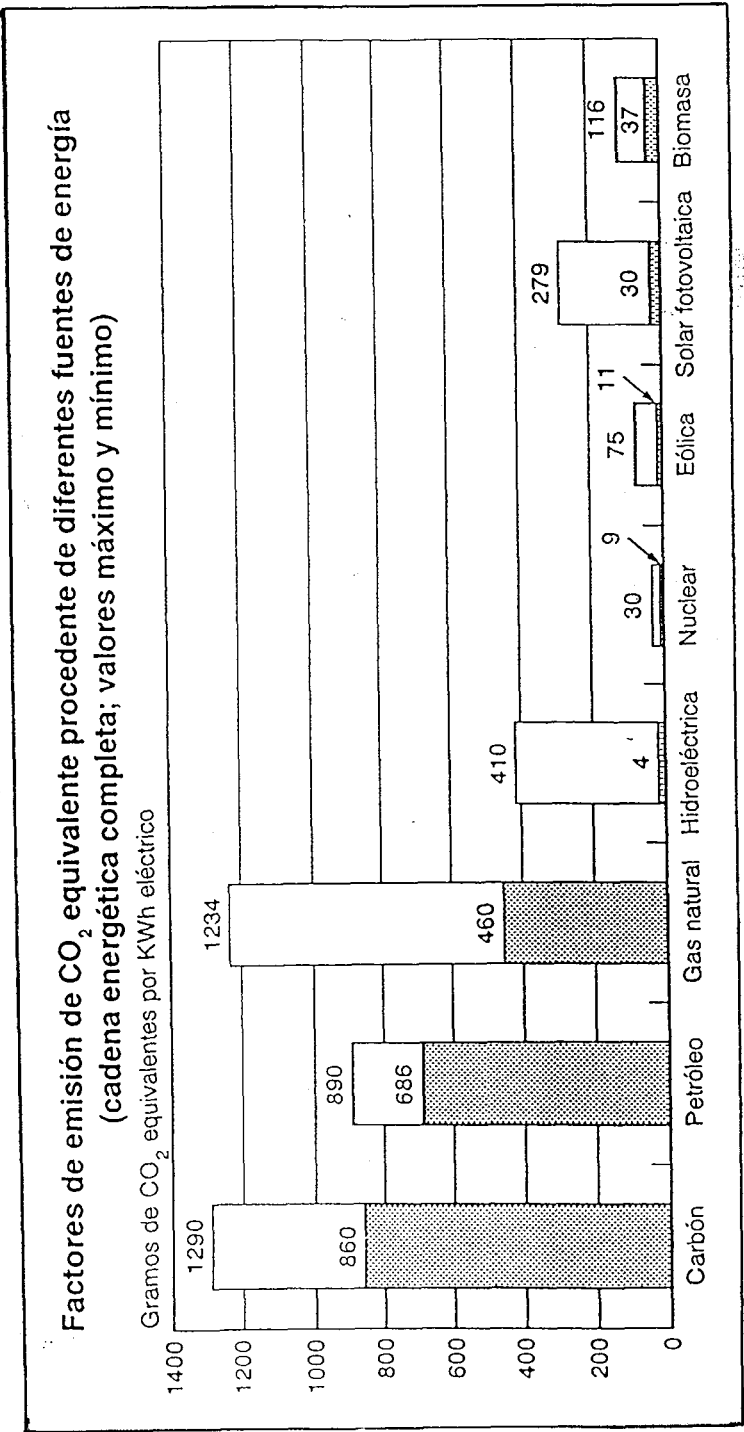
Abb. 4: CO₂-Emissionen bei der Elektrizitätserzeugung aus unterschiedlichen Primärenergieträgern.
1) Mit Rauchgasreinigungsanlagen.

Figura 17



▲ CO₂ emissions for different electricity technologies. (HELSINKI, MAY 1991)

Figura 18



The indicative breakdown of the indirect CO2 emission factor for nuclear

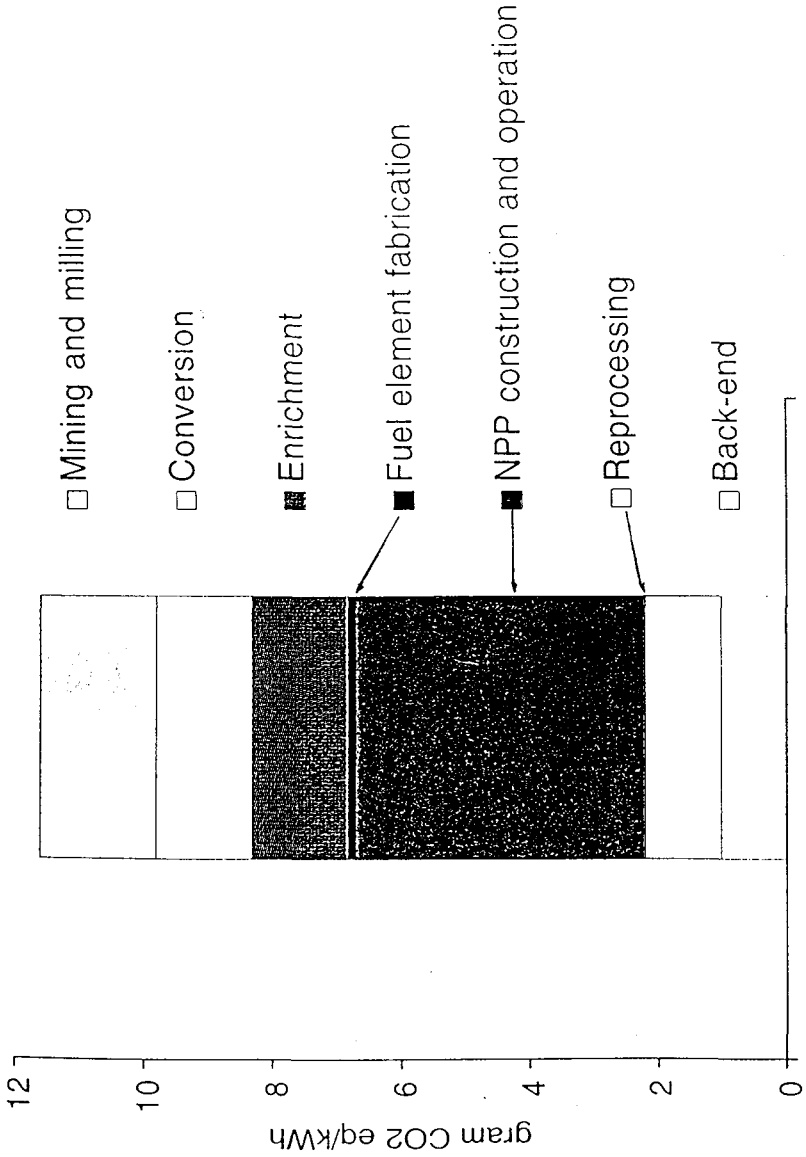


Figura 19

Sin embargo, aunque el CO₂ sea el principal, cuantitativamente hablando, de los gases que producen el efecto invernadero, no deben olvidarse las emisiones del dióxido de Azufre y de los óxidos de Nitrógeno. En la Tabla-25 se dan los valores obtenidos en centrales térmicas francesas de diversos tipos.

Tabla-25

**Emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x
Por kWh generado.**

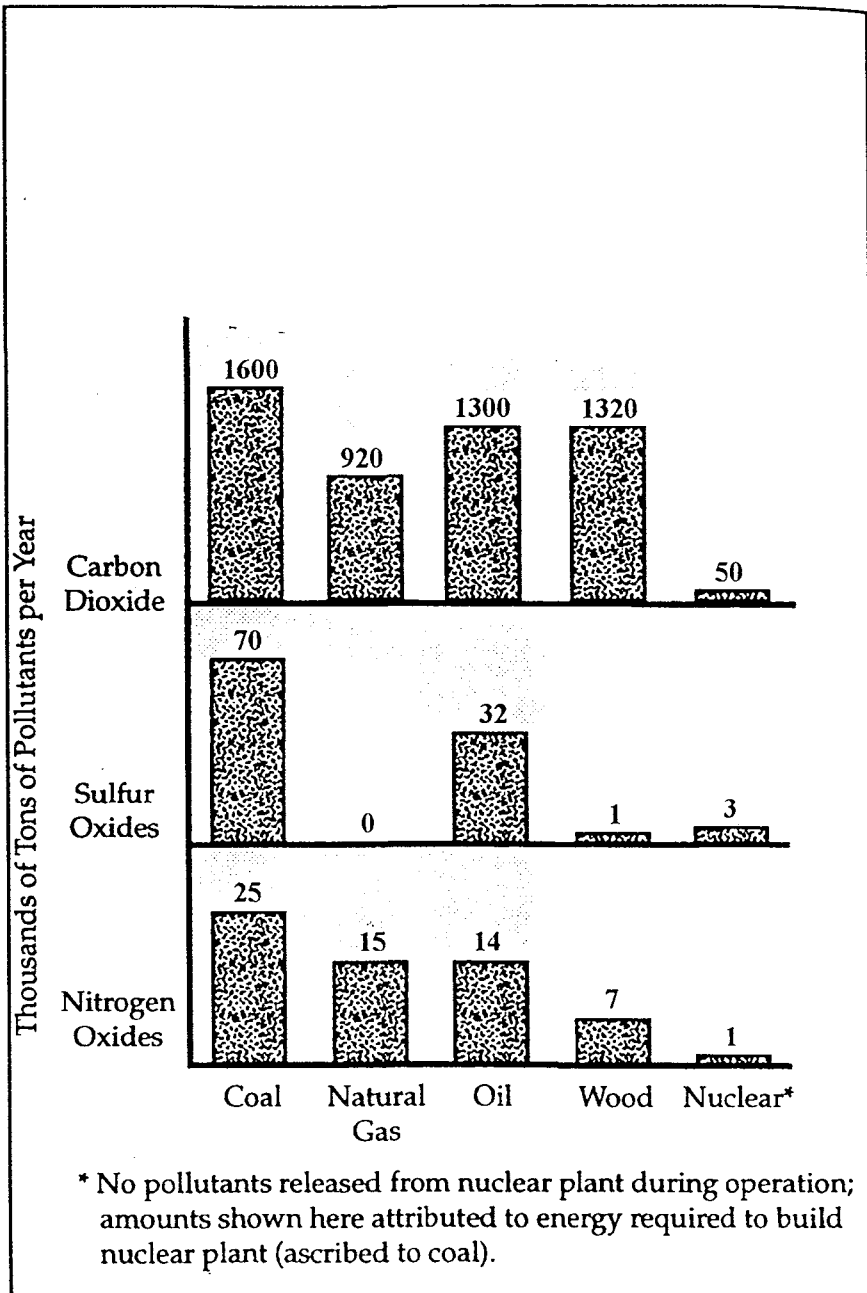
<u>Instalación</u>	<u>CO₂, kg.</u>	<u>SO₂, mg.</u>	<u>NO_x, mg equivalentes de NO₂</u>
Central térmica (carbón con 1%S)	0,95	7.500	2.800
Central térmica (fuelóleo con 1% S)	0,80	5.000	1.800
Cogeneración (turbina de gas)	0,22	0	35 – 1.510
Cogeneración (motor de gas)	0,29	0	1.400
Cogeneración (fuelóleo, turbina de vapor)	0,46	2.930	990
Cogeneración (carbón, turbina de vapor)	0,57	4.400	1.170

En otras unidades, miles de toneladas de contaminantes anuales vertidas por centrales de 1.000 MW alimentadas con carbón, gas natural, petróleo, madera y Uranio, la figura 20 reafirma la diferencia entre los combustibles fósiles y la biomasa, sin nueva plantación, frente a las centrales nucleares a favor de éstas en cuanto a emisiones gaseosas.

La sustitución progresiva del carbón por el gas natural y el creciente empleo de la cogeneración, que implica el cambio del sistema caldera-turbina de vapor por el conjunto turbina de gas-caldera-turbina de vapor, con el valor añadido del gran aumento del rendimiento en el aprovechamiento energético del combustible y el uso intensivo en algunos países de la energía nuclear han dado como resultado un menor consumo de combustibles fósiles en el total de la energía primaria consumida, expresada en toneladas de carbón por tonelada equivalente de petróleo consumida. Esto se comprueba fácilmente en la figura 21. Es de notar la elevada intensidad de China y la India, muy próxima a un consumo casi único del carbón (Intensidad=1) con la India indicando una cierta tendencia a su reducción.

Algo parecido puede apreciarse en países industrializados. Es evidente que la variedad de fuentes no emisoras de CO₂ hace que los valores de la intensidad de Carbono sean siempre inferiores a 0,85 en Estados Unidos, Japón y Francia. Pero, así como en Estados Unidos la disminución se interrumpe hacia 1980, en el Japón y sobre todo, en Francia la bajada es notable por el vigoroso programa de construcción de centrales nucleares llevado a cabo en Francia y que continúa en Japón.

Figura 20



*Environmental Pollutants Discharged into the Atmosphere
(1000 MW Electrical Plants)*

Carbon Intensities of Primary Energy, expressed in tons of carbon per ton of oil equivalent energy (tC/toe).

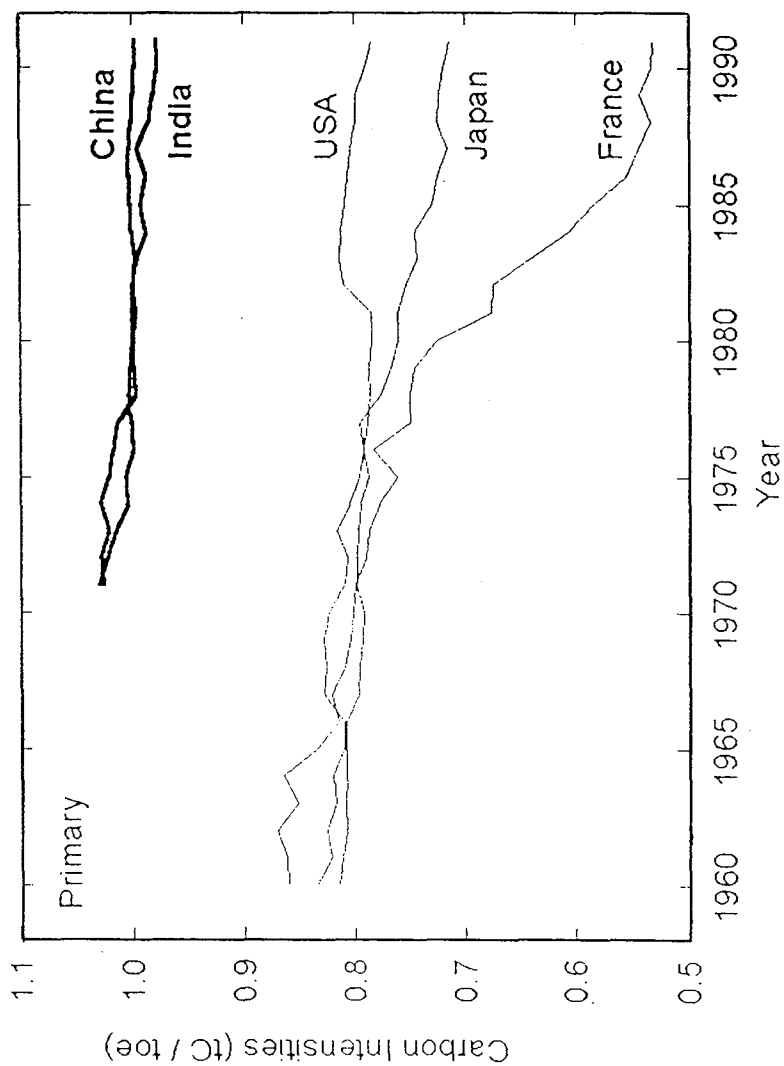


Figura 21

Después del efecto sobre la atmósfera, que es la más débil de las grandes zonas de la biosfera, conviene también examinar el impacto de la generación de energía sobre las masas acuosas de la Tierra, ríos, lagos, mares y océanos.

El efecto contaminante de las emisiones y vertidos es relativamente pequeño y en su mayor parte indirecto. Puede proceder de los gases de chimenea de las centrales térmicas en zonas alejadas originando las lluvias ácidas, si bien este fenómeno no suele presentarse en las zonas cercanas a las centrales a causa de la gran altura de las chimeneas y la elevación que alcanzan los gases por ella conducidos. Este efecto y otros derivados del arrastre de partículas sólidas se han reducido en las instalaciones últimamente construidas al habérselas dotado de medios más eficaces de retención de los componentes ácidos (SO_2 y NO_x) y de las cenizas volantes.

Ni las centrales nucleares, ni las energías renovables, salvo la geotérmica que depende de su origen, emiten componentes que puedan dar lugar a lluvias ácidas. Ni siquiera la biomasa, que sí origina CO_2 y puede dar lugar a NO_x a temperaturas altas, produce SO_2 por no contener compuestos de Azufre. La demás energías renovables sólo pueden contaminar en el proceso de su construcción, fabricación o desmantelamiento.

La principal contaminación, que es evidentemente más importante en ríos y lagos, es la aportación de calor, que depende del caudal empleado para la refrigeración comparado con el caudal del río o el volumen del lago, según sea el caso, ya que en los mares y océanos la dilución suele ser muy rápida.

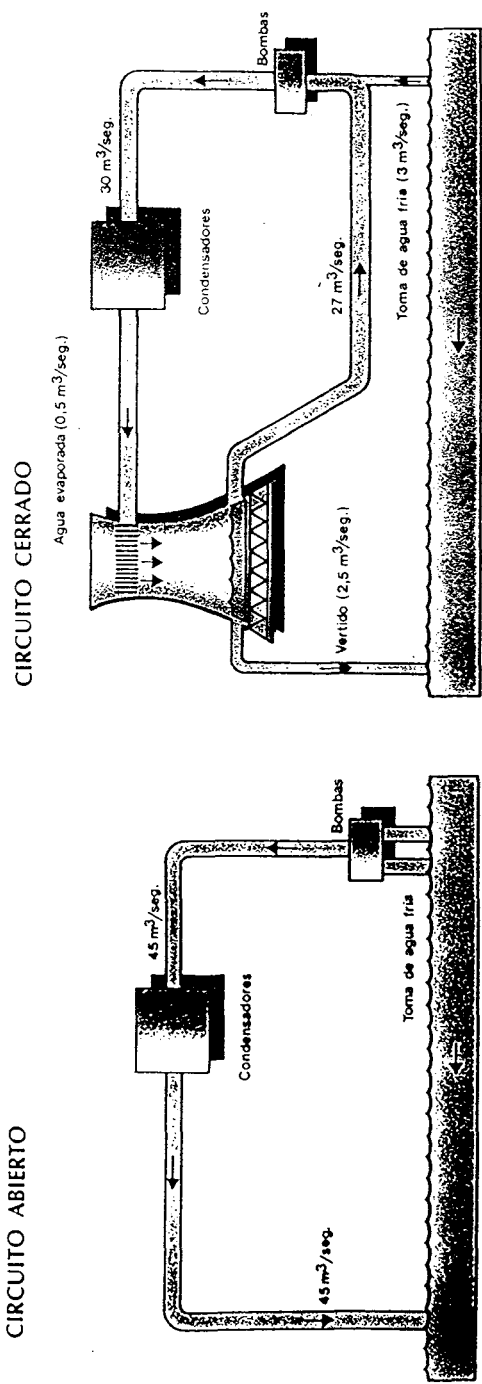
En la mayor parte de las centrales térmicas y nucleares situadas en el interior, a fin de proteger el ecosistema, se deben devolver las aguas de refrigeración a una temperatura no demasiado diferente de la del río o lago y para ello deben enfriarse, lo que suele hacerse por contacto con aire impulsado o aspirado por medio de soplantes o ventiladores y en muchos casos por tiro natural provocado por la menor densidad del aire húmedo en las grandes torres² de refrigeración que han adquirido el carácter distintivo de las centrales generadoras de electricidad.

El enfriamiento se hace a expensas de la evaporación de una parte del agua a enfriar. En el caso de una central de unos 1.000 MW, que requiera una toma de 3 metros cúbicos por segundo y recircule 30, de ellos 27 procedentes de la torre de refrigeración, el agua evaporada es 0,5 metros cúbicos por segundo y el agua devuelta al río o lago 2,5 (véase la figura 22). Esta cantidad no es baladí. Significa entre 15 y 20 millones de metros cúbicos al año, es decir, un 3-4% del consumo total de Madrid que se marcha a la atmósfera. No obstante, esta cifra es también aproximadamente la tercera parte del agua que se evapora al año por la acción del Sol de un embalse tal como el formado por el conjunto Entrepeñas-Buendía.

El aprovechamiento del calor de refrigeración se ha puesto en práctica en algunos países, entre ellos España, en invernaderos de cultivos tempranos y plantas de adorno, piscifactorías y otras aplicaciones semejantes que requieran calor a temperatura moderada.

Además de la confusión que para muchos representa la nube blanca que sale de las torres de refrigeración y que no es más que vapor de agua, existe otra sobre la posibilidad de contaminación del agua de refrigeración.

Figura 22



La mayor parte del agua de refrigeración se emplea para condensar el vapor de agua que procede de la turbina, último elemento del sistema, tanto en generación o ciclo combinado como en cogeneración. En el condensador de del vapor la presión es bastante inferior a la atmosférica, mientras que el agua de refrigeración está algo por encima. En caso de ruptura de la pared que separa el vapor a condensar del agua líquida, la diferencia de presiones obligaría al agua a entrar y el vapor, contaminado o no, no podría salir.

Los residuos sólidos son particularmente importantes en el caso del carbón y del Uranio.

En el carbón, los productos sólidos más voluminosos son los que proceden de la explotación minera y del lavado y los que se generan en la combustión, escorias y cenizas volantes.

En una central de 1.000 MW que queme 2,5 millones de toneladas al año de un carbón de calidad media se obtienen por término medio 69.000 toneladas de escoria, 6.000 de cenizas de filtros y 377.000 de cenizas volantes. A su vez el almacenamiento de estos residuos crea problemas con el agua de lluvia y lixiviación de los metales pesados que contienen con la posible contaminación de los acuíferos. Finalmente, la clausura tanto de las minas como de la central plantean problemas a la hora de rehabilitar estas zonas para cualquier actividad. Las escombreras deberán someterse para ello a obras de adaptación y siembra de plantas y árboles que fijan el terreno.

En el Uranio, los residuos de la fisión del Uranio son peligrosos por sus emisiones radiactivas que duran largos periodos de tiempo. La controversia sobre estos residuos y la preocupación por los problemas que plantean han creado una serie de mitos o creencias y unas actitudes totalmente encontradas que se enmarcan en todo lo que rodea a la energía nuclear.

Conviene, por tanto, precisar algunas ideas y cifras.

El volumen o peso de los residuos de las centrales nucleares es muy bajo, notoriamente más bajo que el de los residuos tóxicos y peligrosos y mucho más que el de los residuos urbanos, industriales y agrícolas. Así, en Francia, que produce más del 75% de su electricidad por vía nuclear —en España es el 33%— diariamente por habitante se produce 1 kg de residuos urbanos, 10 kg de residuos industriales y 20 kg de residuos agrícolas. De nucleares se producen 3 gramos y de estos el 1 por mil, es decir, 3 miligramos son de combustible gastado. El resto son residuos de baja actividad.

Son los únicos residuos contabilizados y controlados al 100%. La detección de la radiactividad es tan sensible que es relativamente sencillo con instrumentos el seguimiento de cualquier sustancia radiactiva. En todos los países con centrales nucleares el control de los residuos radiactivos es total.

El tiempo de almacenamiento es del orden de unos 250-300 años para los residuos de baja actividad procedentes del funcionamiento de las centrales (productos de corrosión, papel, ropa y filtros contaminados, etc.), lo que puede ser resuelto con la tecnología actual. Los combustibles gastados contienen más del 99% de la radiactividad residual de una central. Se pueden guardar como tales por un período del orden de los 100.000 años, que se reduce a unos 10.000 si se reprocesan y se separa el Plutonio de los restantes productos de la fisión del Uranio. Si además del Plutonio se separan el Americio y el Neptunio este período se reduce a unos 2.000 años.

La cuestión que se plantea es si se puede, con los medios técnicos y científicos actuales, garantizar que durante ese tiempo los elementos radiactivos no se ponen en contacto con los seres vivos ni se incorporan a la cadena trófica y después a los humanos.

Para asegurar que esto no ocurre se utiliza un triple camino: convertir el residuo en un producto fisicoquímicamente estable –un vidrio-, rodear a este vidrio de un cierto número de barreras en forma de metales poco corroibles y con suficiente resistencia mecánica y colocación del conjunto vidrio-barreras en una estructura geológica estable al paso del agua y a los efectos de cualquier fenómeno natural –terremotos, glaciaciones, etc.-. Cumplen estos requisitos formaciones geológicas tales como domos salinos, rocas primarias y arcillas.

Existen antecedentes de que estos estrictos requerimientos pueden ser alcanzados, aunque existen opiniones contrarias basadas en el hecho de que las soluciones a adoptar no tienen precedentes en la historia de la Humanidad.

El problema es técnicamente solucionable, pero quedan aún por resolver los temores del público, lo que exigirá información y transparencia informativa.

Se trata de un problema, más social y de opinión pública, que de tecnología por lo cual habrá de resolverse políticamente.

Riesgos y accidentes.

Todas las actividades humanas, de una forma u otra, utilizan la energía. Todo actividad implica un riesgo y el uso de la energía o de los instrumentós, equipos o instalaciones donde se genera, se distribuye, o se consume conlleva una cierta exposición a peligros unas veces conocidos, otras desconocidos, en ocasiones inmediatos y en muchos casos latentes o diferidos.

Tanto las energías primarias como las energías finales, así como los vectores energéticos que la transportan, llevan implícitos riesgos. En estos casos la estimación del riesgo puede hacerse atendiendo a la experiencia y a la estadística. No ocurre así con actividades en que no se conoce el riesgo inherente o adjudicable a la energía y el riesgo que es independiente de ella.

La definición normal de riesgo como producto de la probabilidad de que ocurra un suceso por el daño producido a causa del suceso permite evaluar el riesgo en un sistema determinado. Es preciso para ello analizar los fenómenos elementales que pueden ocurrir en el sistema y que le desvían de su estado o funcionamiento normal y que obedecen, en los sistemas energéticos, a causas de origen mecánico, térmico, eléctrico, químico, nuclear y humano. Para ello se utilizan métodos conocidos (árbol de sucesos, árbol de fallos, etc.) que definen las consecuencias finales. El análisis puede hacerse desde el daño final hacia el origen basándose en lo que se llama el máximo accidente creíble o evaluando las probabilidades de los sucesos aislados e incluso de combinaciones de estos.

Es esta segunda forma de evaluación la que está demostrando ser más útil y realista.

Los daños suelen ser más fáciles de evaluar porque estadísticamente se dispone de más información tanto de los efectos sobre los bienes como sobre las personas y el ambiente y tanto de los efectos inmediatos como remotos.

Muchos de los efectos de los diversos tipos de energías son desgraciadamente conocidos como ocurre con los efectos sobre los bienes después de un accidente.

Más difíciles de evaluar son las consecuencias de los vertidos y emisiones permanentes o muy continuadas. Hasta ahora ha habido una preocupación relativamente poco destacable, pero ya se aprecian ciertas voces que se elevan para apuntar la necesidad de estimar los daños sobre edificios y monumentos que produce la

contaminación de la atmósfera de las ciudades. Son típicos los casos de las macrociudades como Méjico, D.F, Santiago de Chile y muchas otras de la India, Japón y China. Casos especiales de difusión a larga distancia lo constituyen la acidificación de los lagos escandinavos o la contaminación producida por el accidente de Chernobil.

Las consecuencias sobre los humanos son conocidas por las llamadas enfermedades profesionales, de las cuales quizá sean las de la minería del carbón las más conocidas.

Los efectos producidos por la combinación de las emisiones gaseosas afectan de modo notable a las ciudades situadas en zonas industriales o con desfavorables condiciones meteorológicas y sin una adecuada reglamentación sanitaria.

Un estudio todavía no concluido de la OCDE ha evaluado los efectos del uso de los combustibles fósiles para generar electricidad sobre la salud pública y ocupacional, las cosechas, la producción de madera, el ecosistema marino, los materiales de construcción y el ruido. Las cifras provisionales en ecus por kWh producido se dan en la figura 23.

Como puede comprobarse, los mayores efectos son para la salud pública, los materiales y la salud ocupacional en ese orden y evidentemente, de mayor a menor el carbón y bastante menores los del petróleo, lignito y gas.

El estudio continúa con el resto de los tipos de energía, pero aún no han sido dados a conocer los resultados.

Sin embargo, las centrales nucleares son las que despiertan una mayor inquietud. Los efectos de las radiaciones ionizantes y la falta de distinción para muchos entre radiación y radiactividad hacen que sea observada con una particular atención. Otro factor importante que en ello interviene es el debido a su historia de explosiones militares y de accidentes como los de Three Mile Island y Chernobil, que hacen reclamar dosis de radiación cada vez más bajas y evocan el espectro de enfermedades mortales y de anomalías genéticas.

Los efectos sobre el ambiente, con un criterio geográfico, pueden ser locales, a distancia media y globales.

Los efectos locales son los más destacados en los medios de comunicación por tratarse de accidentes. De ellos los más conocidos son los vertidos de crudos y otros productos petrolíferos, los incendios y explosiones de gas, los accidentes de minas de carbón y la rotura de presas.

Si se llevan a cabo las largas evaluaciones de las probabilidades de ocurrencia de accidentes en los sistemas energéticos las diversas formas de expresión final son relativamente coincidentes en sus resultados. Algunas de las evaluaciones realizadas con motivo de la conferencia de Helsinki en 1991 sobre la electricidad y el ambiente presentan tanto el riesgo de accidentes mortales como el de riesgos diferidos producidos por enfermedades de las llamadas profesionales que dan acceso al cese permanente del trabajo. Así, en la figura 24 se expresan para ambos casos el número de muertes por Gigawatio eléctrico producido al año con carbón, petróleo, gas, madera, solar térmica y fotovoltaica, eólica, hidráulica y tres tipos diferentes de reactores nucleares: de agua ligera, de alta temperatura y rápido reproductor. Se excluyen evidentemente de la comparación los accidentes llamados severos de carácter catastrófico, de los que trataremos más adelante, y se incluye la construcción, el ciclo de fabricación del combustible, si lo hay, y el desmantelamiento final.

Damage Value Estimates for Fossil Fuel Cycles

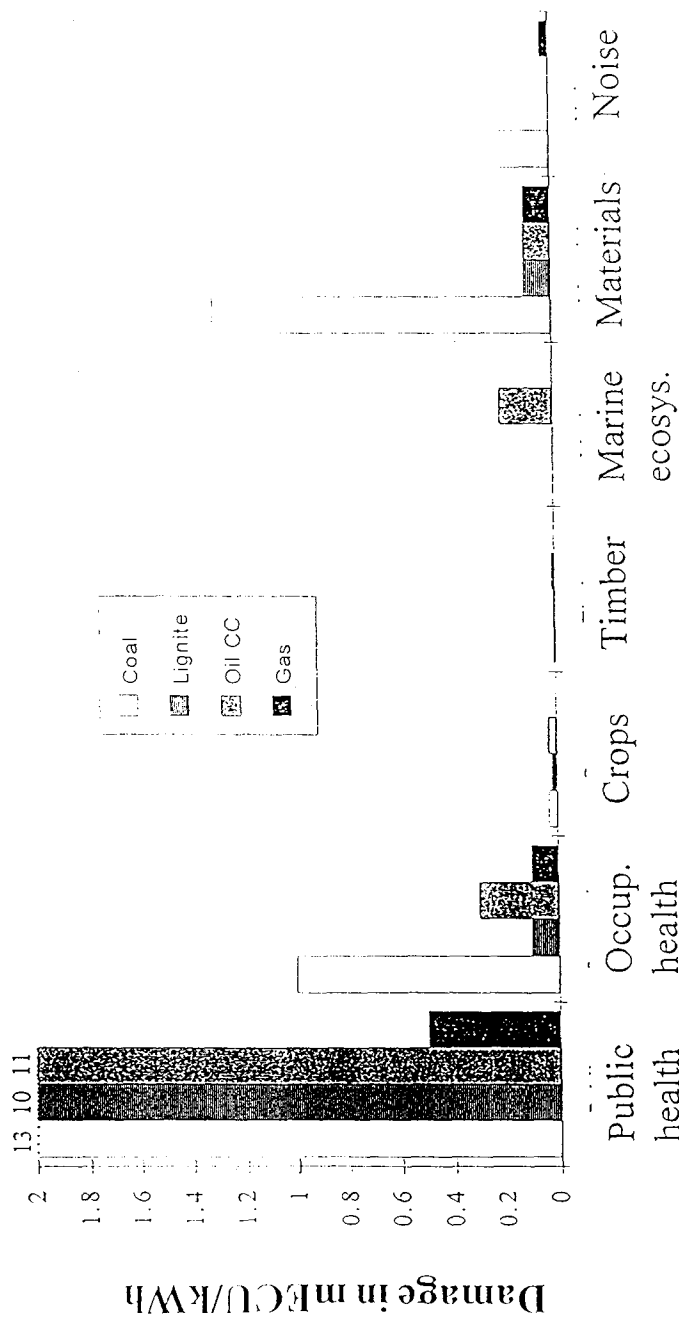
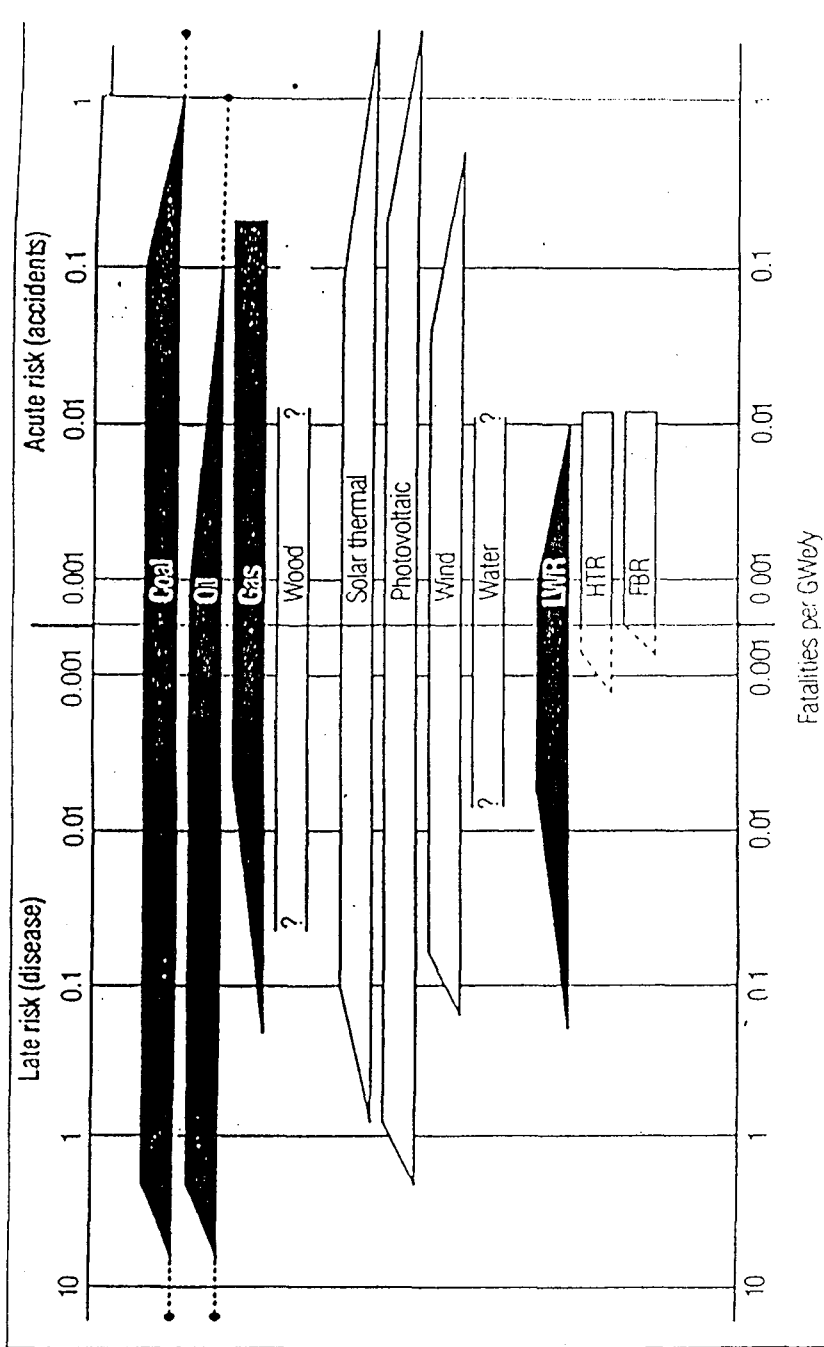


Figura 23

Figura 24



▲ Public mortality risk due to electricity production (all steps of the fuel cycle; without severe accidents).

Source: colloque d'experts de Haut niveau sur
l'électricité et l'environnement. Helsinki 13-17
mar 1991

Puede observarse que los combustibles fósiles, especialmente el carbón, producen en ambos tipos de riesgo los mayores efectos, seguidos de las llamadas energías renovables, destacando en estas la energía solar en sus dos modalidades de empleo.

Un orden semejante aparece en la comparación más sencilla del total de muertes por Megawatio-año producidas por diversos sistemas energéticos en la que no se distingue entre tipos de reactor nuclear, pero sí se incluye la fabricación de metanol a partir de la biomasa y el sistema basado en las diferencias de temperatura en el océano (véase la figura 25).

Se combinan aquí las muertes ocupacionales y producidas entre la población y los valores más bajos corresponden al gas natural seguido por la energía nuclear.

La revisión más completa de la probabilidad de un accidente que produzca un cierto número de muertes en función de la cantidad generada de electricidad, expresada en Gigawatio-año, ha sido hecha, dentro del Organismo Internacional de Energía Atómica, por el Grupo Internacional de Expertos en Seguridad Nuclear, agrupando los estudios realizados hasta el año 1992.

En la publicación INSAG-5, The Safety of Nuclear Power, se presentan los resultados completos, resumidos en la figura 26.

Se incluyen el uso del carbón, petróleo y gas, los accidentes en las minas y en el transporte de carbón, en las refinerías e incendios del petróleo y en las centrales nucleares de agua ligera. En este último caso se presentan los valores de la primera y más antigua evaluación, el informe Rasmussen, y la más reciente, el Estudio Alemán de Riesgos, que matiza unas veces al alza y otras a la baja los cálculos presentados por Rasmussen.

En cualquier caso, aquí también se confirma que, a energía producida constante, la probabilidad de muertes por accidente es mucho menor en las centrales nucleares actuales que en las centrales térmicas o hidráulicas. No se consideraba aquí el empleo del gas natural para generar electricidad dado que en la Comunidad Europea estaba entonces prohibido.

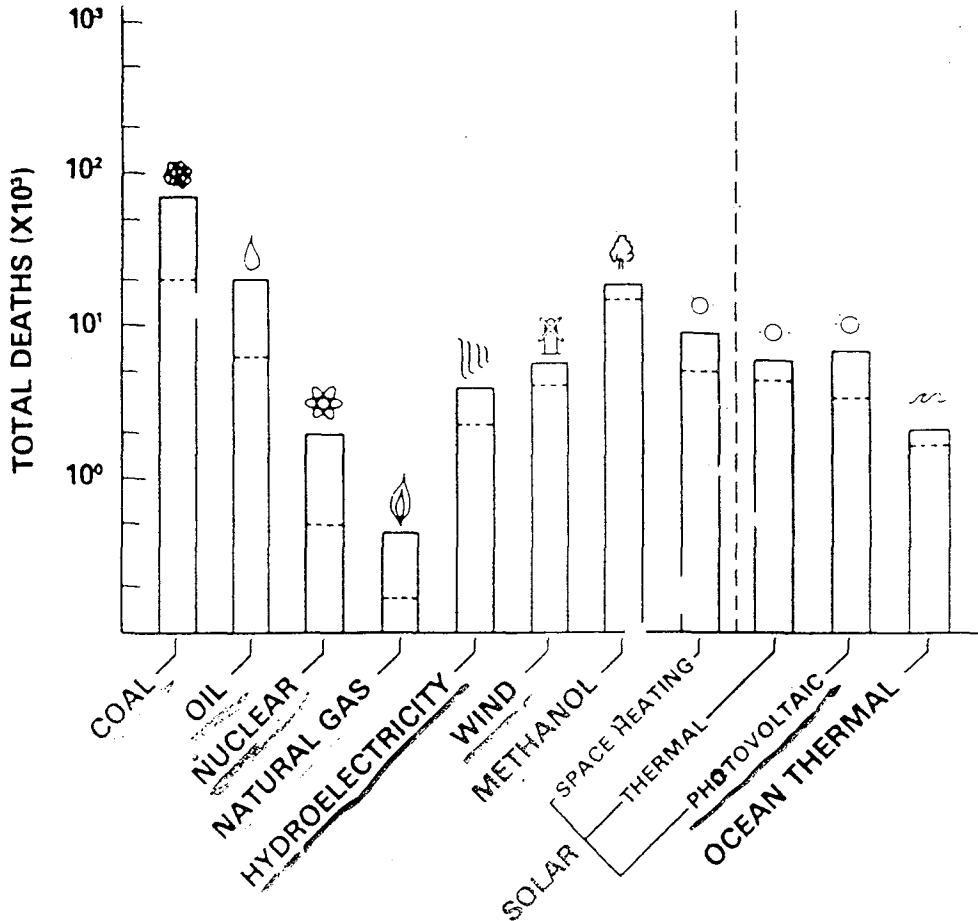
Otra forma alternativa es la presentación del riesgo ocupacional colectivo y de los hombres.año necesarios para la producción de una cierta cantidad de energía. En la figura 27 se presentan los casos del petróleo, reactor nuclear de agua a presión, carbón y energía solar térmica y fotovoltaica.

Para una producción de un Terawatio/hora, el petróleo presenta los menores requerimientos en hombres.año con el valor mayor para la energía solar térmica, semejantes para carbón y solar fotovoltaica y con un valor más cercano al petróleo para el reactor de agua a presión.

Para esa misma energía producida los días equivalentes de trabajo perdidos son también mínimos para el petróleo y en escala ascendente el reactor nuclear, la energía solar fotovoltaica y térmica y muy destacado el carbón.

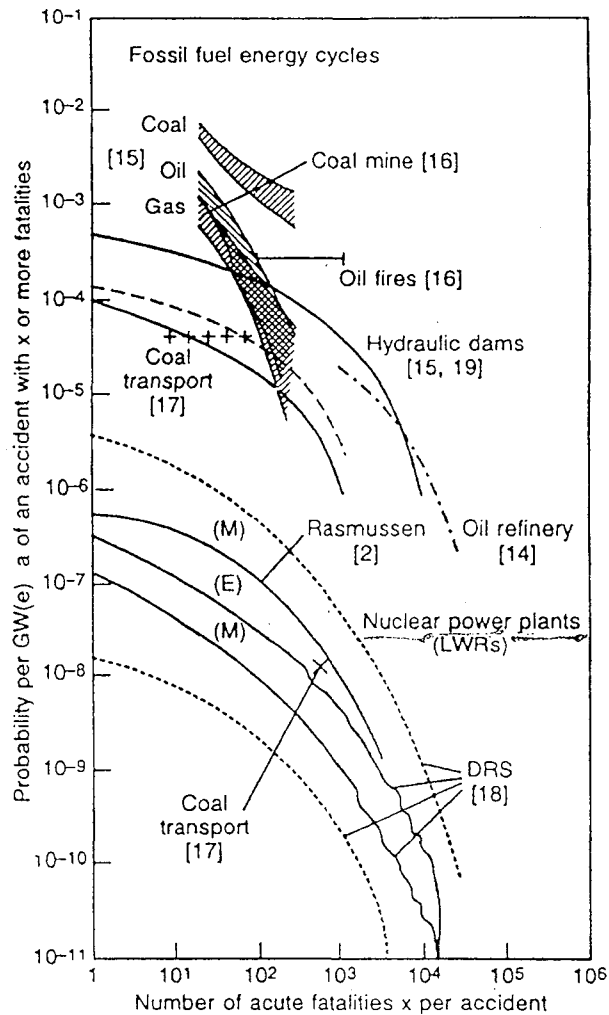
Figura 25

Energy Risk Assessment



Total deaths, times 1000, per megawatt-year as a function of the energy system. (See explanation in caption to Figure 9.) For this graph, the public and occupational deaths are combined. Natural gas-fired electricity has the lowest value, followed by nuclear.

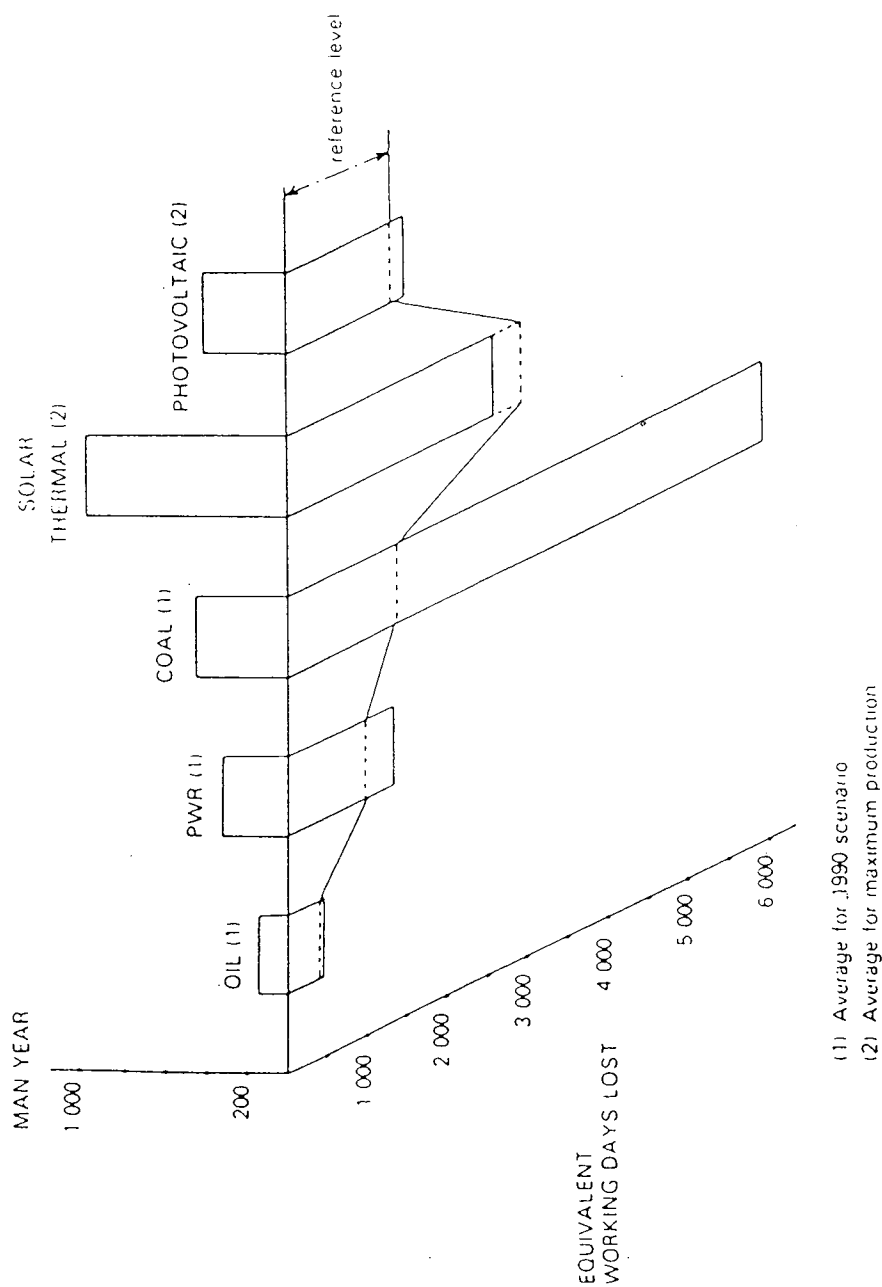
Figura 26



Probabilities per gigawatt-year of electricity production of immediate fatalities due to severe accidents for nuclear power, hydropower and fossil fuel options. ((E) is the reference curve determined on the basis of the mean values of the expected release category frequencies; (M) is the curve determined on the basis of the median values of the expected release category frequencies; LWR: light water reactor; DRS: German Risk Study [12]) (after Refs [9, 13]).

SOURCE : INSAQ-5. THE SAFETY OF NUCLEAR POWER. IAEA 1992.

Figura 27



Collective occupational risk and manpower normalized to a 1 TW·h production.

De estas comparaciones puede deducirse la comprobación de que todas las formas de energía tienen aspectos negativos en cuanto a su impacto sobre el ambiente y en cuanto a riesgos, pero el orden real en ambos conceptos no suele coincidir con las creencias generales de la población. Cuando se excluyen las grandes catástrofes, la generación de electricidad por los combustibles fósiles suelen dar los mayores índices de siniestralidad, si bien las llamadas energías blandas, que suelen coincidir con las llamadas renovables, ofrecen también valores comparables, aunque algo más bajos, cuando se contabilizan desde el comienzo de la obtención de los combustibles o de los componentes de las instalaciones necesarias. En todas las comparaciones la energía nucleoelectrica aparece como una de las más bajas generadoras de riesgos de todas las formas de producción de electricidad.

Accidentes graves relacionados con la energía

Como toda actividad humana, todas las actividades relacionadas con la energía ofrecen un riesgo que, en ocasiones generalmente imprevisibles, se presenta con carácter catastrófico. Unas veces se debe intrínsecamente a que el riesgo se acentúa con la concentración de energía. En otras, el riesgo se acrecienta cuando confluyen otros factores de riesgo como son los fenómenos naturales.

En muchas ocasiones se ha comprobado que las grandes catástrofes están asociadas al fallo simultáneo o sucesivo en un período de tiempo relativamente corto de un cierto número de componentes o factores que por sí mismos individualmente no hubieran producido el accidente.

Esto explica que se tienda cada vez más a evitar las causas de fallo común que afectan simultáneamente a componentes importantes e incluso a sistemas que deben actuar de manera independiente.

La experiencia humana, que tiende siempre a operar por tanteos, solamente es capaz de prever algunos efectos de sus previsiones. En gran parte, los accidentes surgen como consecuencia de un conocimiento insuficiente de las situaciones que pueden plantearse, lo que abarca las limitaciones de la tecnología y la consideración de variables nuevas que súbitamente adquieren una importancia que hasta el accidente no habían tenido.

En el coloquio de Helsinki de 1991 se presentó un resumen de los accidentes más importantes relacionados con la energía ocurridos en los últimos 25 años, detallados en la figura 28. Es digno de mención el hecho notable de la diversa repercusión que ha tenido en el público, en los medios de comunicación y en las organizaciones relacionadas con el ambiente los accidentes relacionados en dicha figura, que tampoco puede considerarse completa, como lo prueba la comparación con la figura 29, en que se dan los accidentes con combustibles fósiles entre los accidentes nucleares de Three Mile Island y Chernobil. Tampoco es exhaustiva la lista de ruptura de presas que tantas tragedias han ocasionado, como se ve en la Tabla-26.

De ninguna de estas catástrofes, salvo de Chernobil, se han conmemorado los aniversarios de la fecha en que ocurrieron, ni se han recordado con igual sentimiento las pérdidas humanas que en ellas tuvieron lugar.

La industria nuclear no se ajena tampoco a los accidentes, como se detalla en la Tabla-27, de la que hay que destacar el de Chernobil, más que por el número de muertos por la extensión de tierra que contaminó y por el número de personas que recibieron dosis apreciables de radiación.

Figura 28

TABEAU . QUELQUES ACCIDENTS GRAVES LIES A L'ENERGIE

Source	Emplacement	Pays	Année/événement	Décès immédiats		Atteintes à l'environnement
				Parmi les travailleurs	Dans le public	
Charbon	Aberfan	Sud du Pays de Galles, (Royaume-Uni)	1966 Glissement d'un terrain		144	
Stockage des déchets						
Extraction	Yubari	Japon	1981 Explosion de gaz	93		
	?	Chine	1982 Avalanche	284		
	Natal	Afrique du Sud	1983 Griseou	63		
	Omuta	Japon	1984 Incendie	83		
	Mei Shan	Taiwan (Chine)	1984 Incendie de puits	121		
	Taipei	Taiwan (Chine)	1984 Explosion	93		
	Hokkaido	Japon	1985 Catastrophe minière	62		
Pétrole	Piper Alpha	Royaume-Uni	1988 Incendie et explosion	187		
Explorat./ production	Amoco Cadiz	France	1978 Marée noire			367 km de côtes
Transport	Betelgeuse	Irlande	1979 Incendie et explosion	48	2	
	Exxon Valdez	Etats-Unis	1989 Marée noire			1600 km de côtes
Oléoduc	Cubatão	Brésil	1984 Explosion et incendie		500	
Gaz	San Juanico	Mexique	1984 Incendie et explosions		> 500	
Stockage						
Gazoduc	Ash-Ufa	Oural (URSS)	1989 Explosion		> 500	
	Huimanguilla	Mexique	1976 Fracture		58	
	Gahri Ohoda	Pakistan	1984 Explosion		80	
	Urals	URSS	1989 Explosion		650-800	
Transport	San Carlos	Espagne	1978 Explosion		218	
	Xilatopec	Mexique	1976 Explosion		100	
Barrage d'usine hydroélectrique	Vaiomt	Italie	1963 Débordement		1989	
	Koyona	Inde	1967		180	
	Canyon Lake	Etats-Unis	1972		240	
	Macchu 2	Inde	1979		2500	
	Gujarati	Inde	1979		15000	
	Orissa	Inde	1980		1000	
	?	Liberia	1982		200	
	Cundinamarca	Colombie	1983		150	
Nucléaire	Tchernobyl	URSS	1986	31	Effets différés (?) (130 000 personnes évacuées)	Grande superficie de terre contaminée

in colloque sur l'électricité et l'environnement
Helsinki 1991 (p 131)

Figura 29

NUMBER OF DEATHS	EVENT	PLACE	DATE
70	Underground oil rig explosion	Bohai Bay, China	Jul 7, 1980
more than 145	Oil tank fire	Caracas, Venezuela	Dec 19, 1982
more than 508	Gasoline pipeline fire	Cubatao, Brazil	Feb 25, 1984
40	Bus collision with oil truck	Damagum, Nigeria	Sep 1, 1984
almost 1600	Passenger ship and oil tanker collision	Mindoro Island, Philippines	Dec 20, 1987
more than 490	Liquified natural gas site explosion	Mexico City, Mexico	Nov 19, 1984
more than 100	Gas explosion in apartment building	Tbilisi, Former Soviet Union	Dec 2, 1984
65	Pit explosion	Zaluži, Czechoslovakia	Sep 3, 1982
44	Series of mine explosions	Yubari, Japan	Oct 1982
98	Gas explosion and mine cave-in	Eregli, Turkey	Mar 7, 1983
36	Explosion and rock falls	Oroszlany, Hungary	Jun 22, 1983
64	Gas explosion in mine	Natal Province, South Africa	Sep 12, 1983
62	Mine Explosion	Yubari, Japan	May 17, 1986
53	Mine Explosion	Guangdong Province, China	Jul 12, 1986
more than 30	Methane gas fire	Donetsk, Former Soviet Union	Dec 24, 1986

*A Sample of Fossil Fuel Accidents in the Eight Years Following
Three Mile Islandⁱ*

Tabla-26

Accidentes por ruptura de presas.

Lugar	Año	Nº de muertos
Bhakra, India	1959	10
Vega de Tera, España	1959	123/150
Frejus, Francia	1959	421
Oros, Brasil	1960	30-1000
Baki Yar, Kiev, URSS	1961	145
Teton, US	1977	9-11
Morvi, India	1979	1335 (>3000)

Tabla-27

Accidentes en reactores nucleares.

Lugar	Año	Víctimas mortales
Chalk River, Canadá*	1952	
Windscale, UK	1957	
Idaho Falls, USA*	1961	3
Detroit, USA*	1956	
Lucens, Suiza*	1969	
Browns Ferry, USA	1975	
Three Mile Island, USA	1979	
Chernobyl, URSS	1986	31

* Reactores de investigación.

Si se comparan estos accidentes ligados a la generación de energía con otros accidentes en industrias de otro tipo, como la química, se encuentran cifras relativamente comparables. Al lado de las emisiones del accidente de Seveso, en Italia, cuyo nombre ha sido aplicado a una Directiva de la Comunidad Europea, donde no se produjeron víctimas mortales o de la contaminación del Rin producida en Basilea, Suiza, a causa de vertidos químicos, que tampoco dio lugar a repercusiones sobre las personas, aparecen las catástrofes de Flixborough, en el Reino Unido, donde murieron 30 personas o la más importante de Bhopal, en la India en 1984, con 3.828 muertos y más de 50.000 afectadas de manera permanente y más de 500.000 de forma temporal.

En la explotación de minas, en los medios de transporte, sean estos, el automóvil, el ferrocarril, el barco o el avión, las estadísticas son mucho más impresionantes y lo mismo ocurre en actividades relacionadas con nuestra vida diaria. Recuérdese, por ejemplo, las consecuencias de la ingestión del aceite de colza desnaturalizado en nuestro propio país en 1981 (entre 386 y 650 muertos y 24.396 afectados) o la epidemia de listeriosis de Suiza por el consumo de queso (31 muertos).

A pesar de todo, todavía los efectos de las catástrofes naturales son superiores a las de las actividades humanas, no teniendo en cuenta obviamente las guerras.

En España, que no es precisamente un país inestable geológicamente hay registros de terremotos con víctimas, de erupciones volcánicas en Canarias, de deslizamientos de tierras y hasta de tsunamis. Las mayores consecuencias son, sin embargo, las procedentes de inundaciones, que tienen lugar preferentemente en las zonas mediterráneas y del norte con multitud de víctimas y daños.

A escala mundial son los terremotos los que producen los mayores efectos. La Tabla-28 da, de manera simplificada, pero estremecedora, algunos de los más importantes que han ocurrido en nuestro siglo.

Tabla-28

Terremotos importantes en el siglo XX.

Año	Lugar	Víctimas mortales
1.908	Sicilia, Italia	80.000
1.920	Han-Su, China	180.000
1.923	Llanura de Kuwanto, Japón	142.807
1.932	Han-Su, China	70.000
1.935	Quetta, Pakistán	60.000
1.939	Chillán, Chile	30.000
1.970	Huaras, Perú	65.000
1.976	Tientsin, China	aprox. 1.000.000
1.985	Méjico, D.F	35.000
1.990	Irán	50.000

Los accidentes son, en consecuencia, un riesgo de vivir y lo han sido desde el principio de la vida del hombre sobre la Tierra.

Seguridad.

La sociedad moderna, según algunos sociólogos, está formada por una combinación armoniosa de tres grupos básicos de la población, con características diferenciadas en cuanto a ideas y comportamiento. Uno, el de los pioneros o innovadores, que consideran a la libertad como su bien más preciado y que suelen ser individualistas, pragmáticos y dinámicos. Un segundo, el grupo formal o metódico, para el que es esencial el orden y que tiende a establecer en todo leyes, reglas y estructuras. El tercero, a veces llamado purista o idealista, establece sus preferencias por la moral, la salud y la protección y ve las cosas con cierto sentido finalista.

Cuando en la sociedad predomina el primero de los grupos, como se comprueba históricamente, se obtiene el desarrollo y la expansión, pero se desprecian los riesgos y no se tienen en cuenta las consecuencias de los avances conseguidos o por conseguir. Este es el caso de las sociedades primitivas o en una primera fase de desarrollo.

Se pasa después a la sociedad ordenada en que las normas de seguridad forman parte de la estabilidad del sistema y se varían a medida que la sociedad demanda nuevos ajustes. Si estos dos grupos predominan, la sociedad en conjunto sigue desarrollándose y continua el retoque de lo que se produjo hasta que este grupo estableció su predominio.

El tercer grupo, presente siempre en toda sociedad, ha constituido siempre un elemento compensador. Alguien ha comparado su misión a la del freno en un sistema automotor en que se necesita motor, mandos y freno. Como consecuencia de los avances de la comunicación, de los efectos del desarrollo sobre el ambiente y de los accidentes cada vez más importantes, este grupo está adquiriendo un papel cada día mayor. Ha estimulado la toma de conciencia ecológica, pero está empezando a desarrollar un fanatismo sectario de poseedor exclusivo de la verdad.

La influencia de este grupo en la sociedad actual, reacia al cambio continuado y defensora de la Naturaleza tal como es hoy, ha convertido los logros alcanzados en la salud pública en una obsesión personal por la seguridad. La idea de la muerte, hasta ahora aceptada como normal, se transforma así en la exigencia de una utópica seguridad absoluta.

Es en este contexto donde se mueve el concepto de seguridad tanto en las actividades industriales como en el terreno de la energía.

Puede pensarse, no obstante, que en la eterna lucha del hombre contra los riesgos naturales o creados por él mismo se ha conseguido vencer o atenuar al menos los riesgos ancestrales de la guerra, el hambre y la enfermedad, pero se han creado o exacerbado riesgos nuevos como el robo, los accidentes, los incendios, el paro, la invalidez y otros. Aparece entonces la paradoja de que esta búsqueda de la seguridad se convierta a su vez en un nuevo riesgo que amenace el propio progreso y se constituya en el origen de una decadencia social, económica o política.

Ello se debe a que es una experiencia histórica que los nuevos avances crean nuevos riesgos, y que las medidas para combatir los riesgos engendran a su vez otros nuevos. Lo que es positivo es el balance. Así, la revolución industrial creó los riesgos de las fábricas y de la industria, pero elevó el nivel sanitario y de bienestar. Así, la guerra fría, con todos sus riesgos, ha dado lugar a un período prolongado de paz general.

Aún teniendo en cuenta estas circunstancias, las industrias de alto riesgo como la aeronáutica y la química y más aún especialmente la energética han desarrollado procedimientos para incorporar a sus instalaciones como elemento intrínseco la seguridad. En el caso extremo de las centrales nucleares se ha llegado a que los estados organicen sus departamentos de seguridad nuclear fuera del ámbito de la competencia del ejecutivo, dotándoles de independencia de actuación y de control administrativo.

La teoría de la seguridad, basada desgraciadamente en el análisis a posteriori de los accidentes ha alcanzado categoría de especialización, y se ha visto favorecida por las medidas experimentales cada vez más precisas, por las posibilidades de cálculo de los modernos ordenadores y por la mejora de los métodos de modelización.

La seguridad incorpora un conjunto de medidas administrativa y técnicas que deben aplicarse en las diversas fases de un proyecto, obedecer a las mejores normas, códigos y métodos de cálculo y dar como resultado una concepción flexible del sistema,

susceptible de incorporar todas las mejoras y avances posibles en la construcción y en el funcionamiento, aún después del inicio de su actividad productiva.

Son criterios de seguridad el conjunto de precauciones adoptadas para evitar los accidentes, o , en caso de que ocurra el accidente, confinarlo, reducir sus consecuencias y evitar su salida al ambiente y finalmente, en caso de su propagación al exterior, minimizar sus efectos.

Comienza todo con una adecuada selección del emplazamiento de la instalación. Además de las normales exigencias de orden logístico y económico, las seguridad implica el estudio geológico, hidrogeológico, sísmico y de posibilidades de efectos de otros fenómenos naturales o debidos a acontecimientos o acciones creados por el hombre.

El estudio del impacto ambiental se ha generalizado recientemente, pero fue exigido desde hace tiempo en los proyectos energéticos. Comprende evidentemente el estudio del emplazamiento y de su entorno desde los puntos de vista geográfico, demográfico, meteorológico, social, económico y de la fauna y flora para poder apreciar los posibles cambios futuros debidos a la instalación.

El impacto debe incluir también los posibles efectos visuales y sonoros, pero, en las instalaciones energéticas, adquiere una consideración del mayor interés el uso del agua como sumidero del calor residual, por lo que es preciso detallar las necesidades de la instalación, los vertidos de las aguas empleadas, en su doble aspecto térmico y químico y el impacto sobre las aguas subterráneas. Las emisiones gaseosas deben ser también objeto de atención, al igual que el estudio del ecosistema anterior a la instalación y el seguimiento de su estado después.

En las instalaciones nucleares se añade además el establecimiento de un estudio radiológico del ecosistema respecto a la radiactividad natural, que sirve de base de comparación y el de un plan de vigilancia radiológica ambiental. Todo ello se engloba en la documentación necesaria para la obtención de la autorización previa, que permite la realización de perforaciones y destinadas a completar el conocimiento del emplazamiento.

En la siguiente fase, la construcción, se deben incorporar en el diseño las normas más exigentes y modernas, la garantía de calidad y los procedimientos más adecuados de construcción y supervisión de todos los sistemas y componentes de la instalación. Una parte importante deberá referirse a la formación y nivel del personal y a la actualización posterior de conocimientos.

Análogamente, para juzgar de la bondad del funcionamiento, deben incluirse en el proyecto la organización, la evaluación de riesgos y, en instalaciones nucleares, la protección radiológica del personal.

Como es evidente, además del sistema de generación de la energía y de todos los sistemas auxiliares necesarios, la evaluación de riesgos habrá determinado los sistemas, componentes o variables a controlar que pueden dar origen a accidentes y en función de ello habrán de determinarse los sistemas correspondientes de mitigación, las redundancias necesarias y las acciones a adoptarse en cada caso.

Si es necesario, como en muchas de las instalaciones con riesgo notable de propagación al exterior, se dispondrá de la contención necesaria, del sistema de circulación del aire en cascada de depresión y de otros medios de confinamiento y de salida controlada al exterior.

En todo caso, en las instalaciones de alto riesgo debe existir un plan de emergencia que prevea las precauciones a adoptar en caso de accidente, las funciones del personal actuante y la evacuación, si fuere precisa, del personal.

Una vez obtenida la autorización de construcción, durante todo el proceso, además de la supervisión propia, los organismos de las administraciones públicas comprueban el cumplimiento de las normas y procedimientos de todo tipo, procediendo al final de la construcción a conceder la autorización de puesta en marcha, donde se comprueban los resultados previstos, y después a la autorización de explotación.

En las centrales nucleares, debe incorporarse un plan de emergencia exterior y la autorización final es sólo temporal, debiendo ser prorrogada tras cada período.

La interposición de barreras entre el posible foco emisor de cualquier producto cuya difusión se quiera evitar es un sistema habitualmente utilizado en la tecnología y alcanza su mejor aplicación en las centrales nucleares y en el tratamiento de los residuos radiactivos.

En ambos casos se trata primero de obtener un compuesto químico, suficientemente estable a altas temperaturas y a la radiación, que debe retener las sustancias radiactivas. En las centrales es el dióxido de Uranio, en los residuos un vidrio de borosilicato al que se han incorporado los productos de la fisión del Uranio.

En el combustible nuclear la primera barrera es la vaina, usualmente de una aleación de Zirconio, y la segunda el circuito primario, formado por la vasija de presión, la tubería y bombas de circulación del agua de refrigeración del reactor y los tubos del generador de vapor en los reactores de agua en ebullición. La tercera es el edificio de contención formado por un recinto de acero recubierto de hormigón.

En los residuos radiactivos el número de barreras depende del diseño. El número mínimo es de dos, el contenedor metálico y un revestimiento que depende de las condiciones del almacenamiento. Entre estas dos pueden interponerse sucesivamente algunas más. Pueden considerarse también como barreras a la difusión de las sustancias radiactivas, los materiales absorbentes que rodean a las estructuras formadas por el residuo y las sucesivas envueltas y que reciben el nombre de campo próximo, así como la formación geológica estable, en la que a una cierta profundidad se sitúan los conjuntos y que se suele denominar campo lejano.

Para las centrales nucleares hay que incorporar evidentemente, además de los sistemas necesarios para la protección del núcleo en todo momento, que se basan esencialmente en la adición de agua y de absorbentes neutrónicos, sistemas de protección de las barreras, entre los que conviene destacar los sistemas de protección de la contención.

Panorama de la situación actual.

La energía, su suministro y su consumo, vienen determinados por un conjunto de factores que, a su vez, influyen de variadas maneras en otros aspectos de la sociedad. Muchos de estos factores son interactivos y todos ellos condicionan cualquier predicción de lo que ha de pasar en el mundo de la energía.

Un informe de Junio de este año de las Naciones Unidas, que analiza la situación global bajo el título "Five Years after Río: Where Do We Stand?" señala los pros y los contras de las tendencias observadas en los aspectos más importantes de la sociedad actual.

De una forma resumida, sin las expresiones que pueden considerarse como voluntaristas o las alusiones a los buenos deseos de los Gobiernos, el resultado puede considerarse como positivo. Se reduce la tasa de crecimiento de la población mundial, aumenta la producción de alimentos, se incrementa la longevidad y mejora la calidad ambiental en algunas partes del mundo. Sin embargo, la escasez de agua, cada día más aparente, la pérdida de tierra agrícola y el aumento de la pobreza en muchas zonas tienden a compensar los beneficios y a generar problemas locales graves. No parece que esta situación llegue a ser catastrófica a nivel global, pero si no cambia, hará difícil llegar al deseado desarrollo sostenible, como expresión de un adecuado compromiso entre crecimiento económico, bienestar y ambiente.

La situación es inestable y tensa porque las diferencias entre ricos y pobres, entre países y aún dentro de estos, siguen aumentando especialmente entre los países industrializados y los países en desarrollo. Los países más pobres, que representan un 20% de la población mundial, viven en una pobreza casi absoluta.

Como contraste, un mismo 20%, el más rico, de la población del mundo continúa consumiendo el 80% de todos los recursos, a pesar de todos los esfuerzos por reciclar materiales, utilizar tecnologías cada vez más eficientes y reducir o minimizar los residuos.

Aunque tendiendo a moderarse, la tasa de desaparición de bosques es demasiado alta. Se estima que son talados o quemados anualmente unos 137.000 km² de los bosques, una superficie que es casi la cuarta parte de la de España. Casi un tercio de la población mundial tiene problemas moderados o graves de escasez de agua potable y es probable que dentro de 25 años estos problemas pueden extenderse a dos tercios de la población.

La contaminación de los mares, especialmente de los interiores, causada por las actividades urbanas y terrestres de todo tipo, industriales y agrícolas, amenaza la salud y condiciones de vida de los dos tercios de la población mundial que viven en zonas costeras. Otro problema añadido a esta población es la crisis pesquera por la sobreexplotación de muchos de los caladeros.

Aunque la producción mundial de alimentos continua aumentando, unos 800 millones de personas pasan hambre y están mal nutridos. Unos 12 millones de km², 24 veces la superficie de España, han perdido apreciadamente fertilidad por los malos métodos de cultivo y el abuso de abonos y pesticidas y una parte ha sido abandonada.

La desertización, por otra parte, amenaza a una superficie casi 3 veces mayor.

En el campo energético el empleo de los combustibles fósiles en los países industrializados se estabiliza lentamente y, en cambio, está aumentando rápidamente en muchos países en desarrollo, con lo que aumenta seriamente la contaminación de la atmósfera. El problema tiene a agravarse ya que se estima que hacia la mitad del siglo XXI el consumo energético global será el doble del actual. A pesar de que esto ocurrirá por el crecimiento del consumo y de la población en los países en desarrollo, en la actualidad casi el 40% de su población no tiene acceso a servicios comerciales de productos energéticos.

Las emisiones globales de CO₂ y otros gases productores del efecto invernadero continúan en aumento a pesar del acuerdo de Río de Janeiro sobre el cambio climático, ratificado por 166 países, por el que habrían de reducirse para el año 2000 dichas emisiones al nivel de 1990. Pocos países desarrollados serán capaces de conseguirlo.

Los residuos de todo tipo continúan siendo un problema sanitario que afecta a los ecosistemas. Los residuos tóxicos y peligrosos y los residuos radiactivos esperan aún una solución definitiva.

Todo ello repercute en las diversas especies que pueblan la Tierra.

Se estima que en las próximas décadas probablemente unas 50.000 especies vegetales y animales se perderán cada año y ello también a pesar del acuerdo de Río de Janeiro sobre diversidad biológica ratificado por 161 países.

Tendencias.

Todos los problemas de la energía están ligados a la implicación que tiene en todas las actividades humanas y por los servicios que proporciona. La energía es sólo un concepto para la mayoría de los humanos, que sólo se aprecia cuando falta, aunque de manera más o menos encubierta aparezca en todas las facetas de la vida actual.

Cosas tan normales como la iluminación, el transporte, la calefacción y el aire acondicionado, los aparatos del hogar, son ejemplos triviales, para no hablar de las comunicaciones, los ordenadores, los relojes, los espectáculos y tantas y tantas otras.

Esta participación de la energía en nuestras vidas es a su vez un motivo o causa de la necesidad de atender la demanda energética y de prever los cambios en nuestras costumbres que modularán su utilización. Cualquier tendencia en nuestros hábitos tiene una repercusión en el consumo energético. De ahí la necesidad de explorar los cambios de todo tipo –sociales, tecnológicos, económicos- que puedan ser previsibles.

Asistimos ya a algo que ocurre en todo el mundo: la tendencia a vivir en las ciudades. Con especial intensidad en los países en vías de desarrollo las ciudades crecen rápidamente. Las megalópolis son ahora corrientes en todo el mundo. Sólo en los países en desarrollo, con una población estabilizada o con bajo crecimiento, el fenómeno se invierte y hay un declive de la gran ciudad. Estas grandes aglomeraciones urbanas son hondos sumideros energéticos, que no pueden ser atendidos con energías diluídas más que en una pequeña proporción.

Uno de los fenómenos fáciles de apreciar es el desplazamiento de las industrias primarias hacia las zonas donde están las materias primas. Estas industrias, grandes consumidoras de energía por lo general, trasladan la necesidad, pero no mitigan el consumo.

Otras experiencias, como los movimientos de la población hacia las zonas templadas del planeta, el aumento del libre comercio, el auge del turismo, la reducción de los horarios de trabajo, tienen una influencia indirecta, pero importante, ya que, lo mismo que la informatización y la creciente importancia de los espectáculos y de los medios de comunicación tienden a aumentar el consumo de electricidad, por una parte, y el del petróleo, por otra, ya que ambos y sobre todo el petróleo constituyen la base de los sistemas de transporte.

Como puede comprobarse de lo anterior todas las cuestiones energéticas se ven afectadas también, además de por factores socioeconómicos y tecnológicos, por factores institucionales, ambientales, de costumbres, de modas, de opinión pública, demográficos, geográficos y evidentemente políticos.

Más específicamente, hay ciertos hechos que condicionan el futuro energético. De ellos conviene destacar la mejora de la eficiencia energética o ahorro energético, que es la acción más directamente ejecutable y de resultados más inmediatos. Requiere algún tiempo en la industria y mucho más en los hogares por depender de un cambio de

mentalidad. Pero conviene destacar que en todos los casos tiene un límite, del que no se puede pasar. La situación es además distinta en los países industrializados que en los países en desarrollo. En los primeros, la mejoras en eficiencia ya han comenzado a introducirse por lo que la intensidad energética —consumo energético dividido por producto interior bruto— está disminuyendo y seguirá haciéndolo al menos durante la primera mitad del siglo XXI.

En los segundos, durante un período más o menos largo según el país particular, el desarrollo predominará sobre la eficiencia en una primera fase hasta que cada país llegue al nivel en que sea posible comenzar a aplicar medidas de ahorro.

Digna de mención también es la relativa constancia de los precios de la energía de origen fósil o nuclear en comparación con las subidas de precio de la mayoría de los bienes utilizados por la humanidad. Por su carácter preeminente en cuanto a utilización, el petróleo es clave para toda variación de precios de cualquier otro combustible o, por comparación, para la introducción en el mercado de nuevas formas de energía. Solamente la energía nuclear, hasta cierto punto, se ve libre de esta dependencia, ya que, por otra parte, esta última sólo produce electricidad y no compite con el petróleo en el transporte ni en la química. Los bajos precios del petróleo siguen siendo, hasta ahora, el mayor obstáculo, aparte de sus características propias, a la entrada masiva en el mercado de las energías renovables más próximas a la comercialización, como es el caso de la energía eólica, aunque su entrada esté favorecida por subvenciones y tarifas altas de su electricidad.

Fenómenos observables también son el creciente uso de la electricidad y la utilización del gas natural como combustible. El consumo eléctrico aumenta en todo el mundo y con un mayor ritmo en los países en desarrollo. El gas natural desplaza al carbón en los países desarrollados y su participación en el total de la energía seguirá incrementándose, no sólo para usos domésticos, sino también en mayor escala para generar electricidad y posiblemente como fuente de Hidrógeno.

La consecución de un ambiente limpio tiene dos aspectos que subrayar. El local o próximo, que generalmente se presenta en las ciudades o áreas geográficas limitadas, con soluciones basadas en evitar o reducir la formación de CO_2 , NO_x y smog (contracción inglesa de humo, smoke, y niebla, fog) lo que conduce asimismo a evitar o reducir los niveles del ozono, llamado malo, que juntamente con los hidrocarburos volátiles, facilita las reacciones fotoquímicas creadoras de la contaminación urbana. El segundo, es global y además del CO_2 en él intervienen también el NO_x y el SO_2 , causantes principales de las lluvias ácidas y el metano, como componentes principales del efecto invernadero.

Ambos aspectos tienden a la sustitución del carbón por gas natural, que, aunque emite CO_2 , no contiene Azufre, si bien su contenido en metano le hace, a través de las fugas y escapes, contribuyente relativamente importante del efecto invernadero, agregándose a las emisiones naturales de dicho compuesto procedentes de los humedales y zonas pantanosas y de los rumiantes.

El incremento del contenido en CO_2 en la atmósfera hace temer una posible influencia sobre el clima, aunque es difícil por el momento diferenciar entre las variaciones climáticas propias de un balance tan complicado como es el del CO_2 y el aumento históricamente comprobable en lo que va de siglo.

La eliminación en los países industrializados de los clorofluocarburos con una acción directa sobre el ozono bueno, el de la estratosfera, que nos protege de la acción de la radiación ultravioleta está contribuyendo a que se cierren más rápidamente los

agujeros formados en ella y desaparezcan en ciertas regiones las afecciones cutáneas que dicha radiación induce.

Es evidente que si la lógica impera estos efectos favorecerán el uso de energías no emisoras de CO₂ como son la energía nuclear y las renovables, excepto la biomasa.

Es de destacar también el pragmatismo de la OPEP, Organización de Países Explotadores de Petróleo, que con una autoasignación de cuotas de producción ha conseguido un equilibrio razonable entre reservas, capacidades de explotación, precios y consumos, que ha asegurado la estabilidad de los mercados durante los últimos 20 años. El resultado de las crisis petrolíferas de 1973 y 1979 sobre ambos lados –productores y consumidores- ha logrado mantener este statu quo, a pesar de que los más favorecidos son los Estados de los países desarrollados, que, en forma de tasas e impuestos, ingresan más que los países productores por sus crudos. No hay señal alguna que indique un cambio de política de ninguna de las partes, por lo que es de esperar que no haya cambios sensibles, al menos en un futuro cercano, de los precios del crudo, lo que de manera indirecta significa también estabilidad de los precios del gas natural –ligado en los contratos al del petróleo-, del carbón y de la electricidad.

Mejoras tecnológicas previsibles.

Los objetivos básicos en todos los casos se basan en la mejora de los rendimientos actuales, que deben traducirse en menores costes de producción y con menores emisiones y vertidos al ambiente. Evidentemente las innovaciones en el terreno energético se benefician de los avances en todos los campos de la Ciencia y la Tecnología que le son afines, de los que podrían destacarse la Informática, la Electrónica, la Robótica, la Biotecnología, la Ciencia de los materiales, la Química y la Física.

Las cifras dedicadas anualmente a Investigación y Desarrollo en el terreno energético son notablemente altas. En la Unión Europea en 1995 pueden estimarse en unos 2 millardos de dólares, en Japón en unos 4,7 millardos de dólares y en Estados Unidos en casi unos 3 millardos de dólares. En España la cifra oficial ha sido de 142 millones de dólares.

Examinemos brevemente lo obtenido en los diversos tipos de energía, comenzando por los combustibles fósiles y de ellos por el más antiguo y abundante, el carbón.

Como roca sedimentaria, el carbón, además del Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, contiene como impurezas Azufre, Nitrógeno y diversos metales. Las amplias reservas, su distribución geográfica y los precios actuales ofrecen poco interés por la búsqueda de nuevos yacimientos, sino más bien por el desarrollo económico de los conocidos y por conseguir una tecnología, comparable con la de los otros combustibles fósiles.

La tecnología desarrollada cubre la purificación previa de la materia prima, la combustión, las emisiones y los usos futuros del carbón.

En el lavado del carbón se han introducido tratamientos fisicoquímicos de separación del Azufre inorgánico (flotación, separaciones electrostática y magnética) y han comenzado a utilizarse en pequeña escala agentes microbianos y enzimas. Dos técnicas predominan en la combustión: el lecho fluidizado (a presión atmosférica o superior) y el empleo del carbón pulverizado, ya que ambas permiten la separación de una gran proporción del SO₂ formado mediante la adición de caliza o cal y la del NO_x mediante urea o amoníaco, así como obtener vapor supercrítico con la consiguiente mejora de rendimiento. Otras técnicas prometedoras como la recombustión y la

combustión con baja formación de NO_x no han alcanzado aún suficiente experiencia comercial.

Como preparación para el futuro continúan estudiándose la liquefacción por hidrogenación directa a altas temperaturas y presiones y la gasificación a gas de síntesis para obtener hidrocarburos mixtos o metanol, según procesos derivados de la síntesis Fischer-Tropsch semejantes al SASOL que funciona en Africa del Sur desde 1955, aportando una fracción importante de los hidrocarburos que consume dicho país.

Las llamadas técnicas limpias comprenden además de las antes citadas la utilización de gas de síntesis para instalaciones de ciclo combinado con turbinas de gas o motores Diesel.

En el petróleo el interés básico en I+D es el aumento de las reservas, ya que, excepto en los yacimientos más importantes, la explotación se va haciendo cada vez más cara y los nuevos hallazgos suelen ser de menor orden, más difíciles de encontrar y a profundidades mayores.

A corto plazo, la exploración tiende a obtener mejores técnicas sísmicas y de obtención de imágenes de las perforaciones y al desarrollo de las técnicas de exploración submarina en aguas profundas y prevención de la formación de hidratos. Coadyuvan a ello el empleo de nuevos materiales de construcción de las tuberías, el uso de robots y un mejor conocimiento del flujo multifásico, bombeo incluido.

La explotación de los yacimientos ofrece grandes posibilidades de mejora de las técnicas actuales de fractura de las rocas y de estimulación para aumentar el rendimiento. Conviene recordar a este respecto que cuando se abandona uno o varios pozos por una explotación que ya no se considera económica, pueden quedar en el yacimiento hasta 2/3 del contenido en petróleo. La inyección de productos químicos, gases o calor mejora ya muchas explotaciones, pero están ya en fase avanzada otras técnicas como el empleo de vapor de agua o de CO_2 , lo que ofrece interesantes posibilidades futuras, inundación con productos miscibles e incluso combustión controlada in situ.

Unido a ello, continuamente se introducen en el refino mejores catalizadores, mejores procesos y un mejor aprovechamiento global de los crudos.

A largo plazo los problemas más interesantes son la exploración de las prometedoras regiones del Artico y la explotación de los crudos extrapesados, de los asfaltos o bitúmenes naturales y de las pizarras.

El interés, cara al futuro, se deduce fácilmente. Un 90% de la producción actual procede de crudos ligeros y medios y, en cambio, estos tipos de crudo constituyen solamente el 25% de los recursos mundiales.

A esto debe añadirse que el 10% restante de la producción actual procede de los crudos pesados y de ellos, casi la mitad (1,5 millones de barriles diarios, 87 millones de metros cúbicos al año) proceden de Venezuela.

En términos generales puede decirse que la explotación de estos recursos no se justifica hoy económicamente. Hay, sin embargo, soluciones parciales de extracción de componentes útiles. Del bitumen se pueden lograr rendimientos interesantes mediante extracción con agua caliente y se investiga en la extracción con agua fría y algunos aditivos, así como con otros disolventes.

Se intenta también realizar mejor, por ejemplo, en lecho fluido o por tratamiento in situ la destilación seca de las pizarras, proceso ya abordado tiempo atrás. Con otra técnica diferente, parece también interesante la extracción de querógeno de una mezcla de pizarra y disolvente mediante tratamiento con radiación ionizante.

El transporte de crudos pesados y bitúmenes por oleoducto requiere una disminución de su viscosidad, lo que puede lograrse por diversos métodos de los que son prometedores los de emulsificación con agua. Un producto así logrado es la orimulsión que es exportada por Venezuela a diversos países en competencia con el fuelóleo en cuanto a su uso en centrales térmicas.

El interés en el gas natural descansa ahora en el establecimiento de una adecuada red de distribución, mediante el transporte a largas distancias desde los yacimientos a los mercados y la promoción en estos de redes internas para su consumo doméstico industrial e incluso para generar electricidad.

Esta última aplicación saca partido del desarrollo de las turbinas de gas a partir de la experiencia de la industria aeronáutica específicamente y de los constructores de turbinas de otros tipos. Con ello se están generalizando rápidamente las instalaciones de ciclo combinado (turbina de gas-caldera-turbina de vapor) en las que pueden obtenerse rendimientos del orden del 50%, lo que justifica su empleo desde el punto de vista económico a pesar del alto coste del gas.

No obstante, a pesar de las reservas existentes, se investigan y en algunos casos se explotan ya, otras fuentes de gas natural menos convencionales. Entre ellas son de destacar las arenas densas, las pizarras devonianas y las vetas de carbón. De las últimas hay explotaciones comerciales en Estados Unidos, Australia, Polonia y China, que transforman lo que antes era un riesgo en las minas de carbón –el grisú– en un producto comercialmente explotable.

El gas natural, cuyo componente mayoritario es el metano, CH_4 , es, después del agua y del petróleo, la mayor reserva de Hidrógeno en el mundo. Eso, más ser el primero de los hidrocarburos, le proporciona un gran interés desde el punto de vista de su utilización como base de procesos químicos. En este sentido es necesario considerar que cualquier transformación posible origina productos de mayor reactividad, por lo que es necesario impedir que la transformación progrese.

Los procesos investigados de obtención de hidrocarburos o alcoholes usan las vías de transformación directa, empleando reacciones de cloración, oxidación parcial o mezclas Oxígeno-Cloruro de hidrógeno en las que se trata de obtener como productos intermedios etileno o acetileno, o de transformación indirecta pasando por gas de síntesis, de manera análoga a lo que se hace en el carbón.

Hasta ahora los límites prácticos alcanzados en los rendimientos de transformación no sobrepasan el 20 ó 25% en la conversión directa y del 60 ó 70% vía gas de síntesis con costes relativamente altos por lo que continúan estudiándose.

La obtención de Hidrógeno por reformado catalítico con vapor de agua o autotérmico, aunque montado en escala comercial, da costes relativamente altos.

Otras técnicas directas en período de desarrollo son las células de combustible y la magnahidrodinámica.

En su estado actual, las células de combustible convierten Hidrógeno o metano directamente en electricidad. Los modelos utilizados emplean superficies entre 0,5 y 1 metro cuadrado para generar entre 0,5 y 1 kW. Las células generan corriente continua con alto rendimiento del orden del 60% o superior, con emisiones bajas de NO_x y ninguna de SO_2 , pero evidentemente sí de CO_2 . Las más avanzadas en cuanto a comercialización son las de ácido fosfórico, con potencias de 200 kW y funcionamiento continuo superior a las 20.000 horas. La entrada en el mercado después ha de corresponder a las de carbonatos fundidos y posteriormente a las de polímeros sólidos y

a las de óxidos que funcionan a temperaturas mucho más altas. Su coste, sin embargo, deberá bajar de los actuales 3.000 dólares por kW.

En la magnetohidrodinámica, una corriente gaseosa de combustible a alta temperatura, sembrada para aumentar su conductividad eléctrica, se hace pasar a través de un fuerte campo magnético para generar electricidad. Como es lógico se pueden utilizar tanto el gas natural como gases derivados del carbón.

Energías Renovables

Las energías renovables han adquirido una gran nombradía y han despertado esperanzas que a veces no responden a la realidad. Informaciones tituladas “La energía del futuro”, “Las energías renovables resolverán los problemas de la contaminación”, “Energía nueva, energía eterna” o “Las energías renovables fuentes de una nueva sociedad” señalan facetas que, en conjunto, son atrayentes para todos.

Debe decirse inicialmente que estas energías son las más antiguas utilizadas por la Humanidad y no sólo de manera pasiva. Ya en el siglo pasado se emplearon colectores solares para hacer funcionar motores de aire caliente y mover el barco americano “Meteor”, se construyó el primer horno solar y se utilizó un concentrador para bombear agua en Pasadena, California. Muchos otros ejemplos existen de utilización de la energía eólica que movió durante muchos siglos molinos y barcos. La biomasa ha sido usada en forma de madera y otros productos del árbol desde la más remota antigüedad, tanto para producir calor como material de construcción polivalente.

La energía de las corrientes fluviales data de antiguo y los molinos maquileros han funcionado hasta hace bien poco.

Los batanes, las primera bombas para extraer el agua de las minas y las primitivas forjas para obtener y trabajar el hierro fueron movidas por energía hidráulica.

La mayor parte de las energías renovables son inocuas para el ambiente, aunque no hayan sido para la construcción de sus instalaciones. Así ocurre con la hidráulica, eólica, solar y las que derivan de la energía contenida en los mares y océanos. No lo son la geotérmica, ni la biomasa, si en este último caso no se plantan o siembran vegetales que compensen la producción de CO₂ en la combustión, solución que no es baladí. Se estima que para compensar las emisiones de una central de 500 MW se requiere plantar árboles de crecimiento rápido en un área comprendida entre 2.000 y 2.500 km cuadrados. El impacto ambiental de todas es de carácter local y se trata más bien de efectos visuales, sonoros y climáticos, más importantes en el caso de las grandes instalaciones hidroeléctricas o en la utilización de residuos industriales o urbanos.

La ventaja más importante es que utilizan como fuente el Sol en su mayor parte y, por tanto, no contribuyen al agotamiento de los recursos naturales más que en la proporción correspondiente a la construcción de sus instalaciones, pero en ello llevan también una característica negativa: su intermitencia, lo que se enfrenta a tendencias de la sociedad actual como son el crecimiento de las ciudades y de las concentraciones industriales.

Se plantea así uno de los problemas tecnológicos y sociales más importantes en un posible uso masivo de estas energías, que, además, excepto la hidroeléctrica, son poco concentradas. Este uso masivo requeriría un cambio total de hábitos, cultura y tecnología, por necesitarse grandes cantidades de energía de manera continuada y muy

localizada a partir de muchas fuentes, variables en el tiempo y dependientes del tiempo atmosférico, casi todas de escasa potencia.

Esta tendencia a la descentralización y a la utilización de muchas fuentes variables en su aportación exigirá muy probablemente una red de líneas de transmisión mucho más tupida y también con gran probabilidad una mayor capacidad de reserva, sí como formas de alivio del exceso de energía cuando se presenten picos de generación, ahora más fáciles de atender.

Hasta ahora la incorporación de la electricidad generada por las energías renovables a las redes eléctricas basadas en las energías convencionales se ha aprovechado de la inercia que proporcionan éstas, frente al pequeño porcentaje de aquellas, pero esta situación se hará más inestable al pasar de la participación actual a la futura (un 5,26% en la Unión Europea ahora y un 12,51% previsto para el año 2010).

La situación actual en Europa, que en términos globales es la más avanzada en el mundo, es desigual entre los países y entre las diversas formas de energía.

Respecto a este último aspecto se puede presentar la clasificación de la Agencia Internacional de la Energía entre relativamente avanzadas, menos avanzadas e incipientes.

Al primer grupo corresponden la hidroeléctrica, la geotérmica de vapor, la calefacción solar y la combustión de biomasa. A la segunda, la eólica, los sistemas pasivos solares, la geotérmica de agua caliente, la biomasa para obtener combustibles gaseosos y líquidos y la solar fotovoltaica. Y a la tercera, la geotérmica de rocas calientes, las mareas, olas y diferencias de temperatura en los mares y la producción de Hidrógeno.

A gran escala la única importante es la hidroeléctrica y la de mayor crecimiento la eólica, siendo ínfima en la Unión Europea la geotérmica.

El mayor obstáculo para la expansión de las energías renovables se deriva de su coste, tanto de inversión, lo que supone un prolongado período de amortización, como de funcionamiento, aunque ha habido una reducción continuada en los últimos años en todas las formas y de manera espectacular en la eólica. En la figura 30 se presentan los costes de producción de 1981 a 1995 de las energías renovables más destacadas.

Este progreso se ha conseguido en parte por las aportaciones de la Unión Europea para proyectos específicos, que no han logrado su objetivo final de reducir por sí solas el efecto invernadero, como reconoce el Consejo Económico y Social en su informe de Abril de 1997 sobre el Libro Verde de la Unión Europea "Energía para el Futuro: Fuentes de Energías Renovables" que establece así su conclusión:

"Es evidente que en la actualidad sólo hay dos alternativas a los combustibles fósiles que pueden ayudar a los Estados miembros de la U.E. a respetar sus obligaciones internacionales relativas a las emisiones de CO₂ y al logro de un desarrollo sostenible: se trata de la energía nuclear y de las tecnologías de energías renovables".

No obstante, la contribución de las energías renovables a la energía primaria total es ya importante. En la Tabla-29 se presenta dicha contribución por tipo de energía renovable de los 15 países de la Unión. Cuantitativamente es importante en Francia, Suecia e Italia y cualitativamente en Austria, Suecia, Finlandia y Portugal.

Figura 30

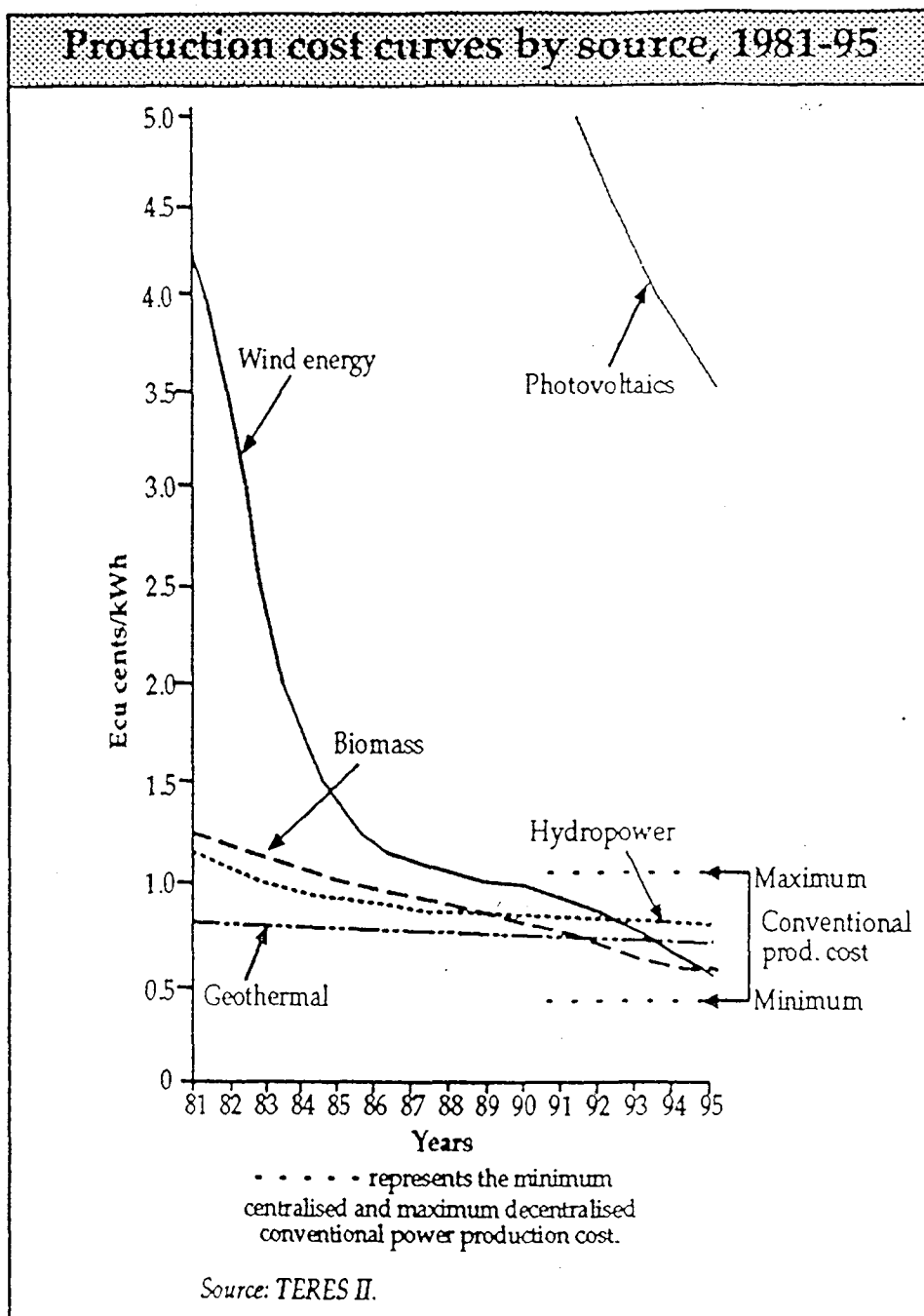


Tabla-29

Producción de energía primaria por energías renovables, TJ

País	Hidráulica	Eólica	Paneles solares	Foto- voltaica	Geo- térmica	Biomasa	Bio- combus- tibles.	Total	1994 %
Austria	123.542	0	0	0	0	130.154	0	259.000	24,1
Bélgica	1.235	31	37	0	53	15.581	297	17.234	0,8
Dinamarca	117	4.093	185	0	45	50.261	0	54.702	7,0
Finlandia	42.613	25	0	0	0	189.934	0	232.547	19,3
Francia	284.530	32	587	0	5.070	399.211	0	693.534	7,2
Alemania	70.557	5.147	1.510	15	360	183.157	4.104	261.860	1,9
Grecia	9.379	135	4.104	1	173	58.522	1.120	72.313	7,2
Irlanda	3.064	65	4	0	2	6.802	0	9.936	2,2
Italia	160.794	23	300	40	96.782	153.533	0	411.472	6,4
Luxemburgo	310	0	0	0	0	1.696	5.265	2.006	1,3
Países Bajos	360	857	118	8	0	39.074	0	40.417	1,4
Portugal	38.537	61	607	2	227	2.229	0	3.171	17,5
España	87.664	631	1.005	7	273	162.294	0	251.874	6,2
Suecia	2.125	259	0	0	0	275.775	0	488.575	24,2
Reino Unido	18.274	1.213	266	0	35	40.103	0	59.891	0,6

La Unión Europea ha realizado una evaluación del futuro inmediato de las energías renovables, bajo los objetivos generales de su política energética de aumentar la competitividad, asegurar el suministro y proteger el ambiente y ha llegado a reconocer que, si no se establecen objetivos, ni se elaboran políticas de apoyo, las fuentes de energía renovables no aportarán una contribución significativa al balance energético de la comunidad.

Para favorecer esta aportación en todos los países de la Unión, ha favorecido los programas nacionales de tal modo que se aumente la investigación y el desarrollo, se subvencionen los cultivos energéticos y se internalicen los costes externos de los combustibles tradicionales.

A base de estas medidas y de las mejores prácticas a obtener y aún reconociendo que “falta mucho para que estas energías sean rentables” y que la actual situación de costes crecientemente más bajos de los combustibles fósiles podrían alejar los objetivos a conseguir, en la Figura 30 se presentan los resultados cuantitativos que se espera obtener en los años 2005, 2010 y 2020 para alcanzar una contribución en el último año del 13,87%.

Además de los resultados que puedan producir las medidas a adoptar se reconoce también que la consecución de los objetivos “depende claramente del éxito de las principales tecnologías a nivel nacional” y que “en lugar de centrar el objetivo en países habría que hacerlo en tecnologías”.

De hecho, como demuestra un examen de la Tabla-29 el logro de los objetivos depende de un número reducido de países y de tecnologías, de las que la hidroeléctrica a gran escala sigue aportando valores superiores o en torno al 50% del total de energías renovables.

Las tecnologías y países clave a estos efectos figuran en la Tabla-30, en la que España aparece en muchas de las tecnologías y tiene un papel destacado dentro de la Unión.

Tabla-30

Tecnologías clave/Países líderes

Tecnología	Objetivo 2010		Países líderes	Objetivos de rendimiento	
	GWh	Ktep		GWh	Ktep
Eólica	82.366	0	Alemania	21.115	0
			Francia	18.918	0
			Italia	8.966	0
			España	4.813	0
Fotovoltaica	12.213	0	Francia	3.568	0
			Alemania	2.747	0
			Austria	1.990	0
			Italia	1.709	0
Maremotriz	4.883	0	Reino Unido	3.755	0
			Francia	1.128	0
Cultivos forestales	42.939	25.666	España	11.088	2.406
			Francia	10.285	3.341
			Alemania	7.866	5.937
			Grecia	3.438	478
Térmica solar	3.504	5.089	España	1.807	2.511
			Italia	966	718
			Portugal	548	367
			Francia	0	739
Etanol/biodiesel	0	15.001	Francia	0	3.669
			Grecia	0	2.883
			Italia	0	2.157
			Reino Unido	0	2.022
			España	0	1.603

Perspectivas algo inferiores ofrece un estudio de la Agencia Internacional de la Energía del año 1996 según la Tabla-31 en la que se dan también los datos del consumo en el año 2010 de todos los combustibles y se les compara con los del año 1993.

Se pasa así al 6,3% de contribución de las energías renovables en 1993 a unos valores entre 7,0% y 8,2% para el año 2010.

En España, excluyendo la hidroeléctrica a gran escala, la producción de energía primaria en 1995 ha sido de 4,25 M tep, un 4,3%, respecto al total, distribuida según la Tabla-32.

Tabla-31

Proyecciones del suministro energético al año 2010
Cifras en M tep

	1993	2010*
Biomasa y residuos	142	194 - 186
Geotermia y restantes renovables	23	75 - 63
Hidráulica	105	125
Nuclear	471	514
Combustibles fósiles		
Sólidos	870	856 - 973
Líquidos	1.768	2.050 - 2.125
Gaseosos	<u>878</u>	<u>1.015 - 1.323</u>
Total	4.257	4.829 - 4.309

* Para dos hipótesis de crecimiento.

Tabla-32

España 1995
Energías Renovables
Energía primaria

	<u>Producción, ktep</u>	<u>%</u>
Minihidráulica	188	4,4
Biomasa	3.807	89,5
Tesiduos sólidos urbanos	187	4,4
Eólica	23	0,5
Solar		
Térmica	45,4	1,1
Fotovoltaica	1,0	0,02
Geotérmica	<u>3,4</u>	<u>0,08</u>
	4.254,8	100,0

Una parte apreciable se utiliza como calor, mientras que la producción de electricidad se basa en la minihidráulica, como puede apreciarse en la Tabla-33, en que están dadas las horas de funcionamiento de cada tipo de energía.

Tabla-33

España 1995
Energías Renovables
Electricidad

	<u>Potencia, MW</u>	<u>Producción, GWh</u>	<u>Horas</u>
Minihidráulica	982,0	2.186	2.226
Biomasa	140,5	783	5.572
Residuos sólidos urbano	68,7	446,3	6.496
Eólica	115,2	270,9	2.351
Solar fotovoltaica	6,5	11,7	1.800

La energía procedente de la biomasa es la más antigua utilizada por la Humanidad. Aún hoy es la cuarta fuente mundial con una participación del 13-14% y es con gran diferencia la más importante de las energías renovables.

Es, sin embargo, difícil disponer de estadísticas fiables, ya que las cifras oficiales no reflejan normalmente muchos de los consumos individuales.

Se estima que la producción actual de biomasa terrestre es de 1 millardo de barriles equivalentes de petróleo al día, es decir, 159 millones de metros cúbicos diarios de petróleo, que constituye unas 5 veces la demanda mundial de todos los tipos de energía, lo que explica la necesidad y las esperanzas puestas en el crecimiento de su utilización.

En los países de la OCDE representa solamente un 3%, empleándose más para calor residencial y menos para usos industriales o para la generación de electricidad. En otros países su proporción es mayor. Puede decirse que el ¼ de la población mundial consume como media el 35% de su energía a partir de biomasa. En algunos países en desarrollo (Nepal, Tanzania y Uganda) la proporción aumenta hasta el 90%. En la India es del 45%, en China y Brasil del 30%, en México y América del Sur del 10 al 15% y en Argentina solamente el 5%. En algunos países industrializados la proporción es alta, Suecia obtiene un 17% y Austria un 13%. Por el contrario, Estados Unidos solamente un 4%.

Todas las materias primas utilizadas como biomasa son obtenidas directa o indirectamente mediante la fotosíntesis. Para su utilización se utilizan tecnologías de combustión para aprovechar el calor, su transformación en electricidad o mediante cogeneración, así como procesos químicos de pirólisis, gasificación, digestión bacteriana o fermentación.

La gasificación y la digestión anaerobia conducen a un gas combustible, el biogas, rico en metano y sustitutivo del primero del gas natural. La pirólisis por la que se obtiene una mezcla de un gran número de compuestos es el proceso menos conocido. La fermentación, que, en el caso más sencillo produce alcohol etílico, es el proceso con más futuro, ya que puede ser conducido mediante la adecuada selección de bacterias.

Ha comenzado a extenderse en algunos países la llamada agricultura energética, basada en el aprovechamiento de ciertas especies vegetales o de sus residuos para generar energía o productos químicos dedicados a fines energéticos. El ejemplo más

destacado realizado a gran escala es del Brasil para producir etanol a partir de los residuos de la caña de azúcar con el fin de ser empleado como combustible de automóvil. Si bien el éxito técnico ha sido grande, ya que se ha llegado a casi un 50% del parque automovilista brasileño movido por alcohol, en opinión de muchos no lo ha sido tanto desde el punto de vista económico, a pesar del elevado volumen de alcohol generado, el gran número de fábricas de alcohol montadas y del imponente servicio de distribución que ha requerido en un país de tan gran extensión.

Otro ejemplo, quizá de menor escala, pero más extendido, es el aprovechamiento de residuos animales para generar biogas. El uso de los purines y del estiércol con este fin ha promovido en muchos países la independencia energética de instalaciones de crianza de cerdos o de producción de leche e incluso la simbiosis, aprovechando el exceso de gas, del cultivo en invernadero de variedades de plantas o vegetales que el clima exterior no permitía. Casos de este tipo son frecuentes en Dinamarca y Holanda.

Aceites vegetales, como los de colza, soja, girasol y coco, se emplean como combustibles de motores Diesel una vez transformados en esteres metálicos. Tienen las ventajas de no requerir adaptación de los motores, a diferencia de lo que ocurre con el etanol y los motores de explosión, de no contener Azufre, emitir pocas partículas después de la combustión y de ser biodegradables en pocos días.

La capacidad de la ingeniería genética para exaltar la producción de sustancias en plantas que las generan espontáneamente, abre posibilidades interesantes para estos cultivos tanto en el campo energético como en la producción de compuestos químicos.

Por el momento, sin embargo, los combustibles obtenidos por vía vegetal requieren ayudas fiscales y de promoción para poder competir con los combustibles fósiles. En el caso más sencillo del aprovechamiento por combustión están aún por resolver los problemas del gran contenido en agua de las materias vegetales, que requiere un secado barato previo antes de la combustión, el bajo calor de combustión y el problema de la recogida y transporte, todos ellos íntimamente relacionados.

No obstante, el abandono de muchas actividades agrícolas y ganaderas en nuestro país por el éxodo hacia las ciudades de la población rural, el crecimiento de la productividad agrícola y los programas de reforestación abren interesantes posibilidades para el futuro, ya que la superficie forestal española, según el Segundo Inventario Forestal Nacional, concluido este año, ha aumentado en más de 400.000 Hectáreas en los últimos 20 años, pasando de 25.622.000 a 26.022.000, siendo especialmente grande el incremento de la superficie arbolada, de 11.792.000 Hectáreas a 14.066.000.

Esto desmiente la idea de que España está perdiendo bosques y coloca a nuestro país en una relación de superficie arbolada a superficie total del 28%, comparable a las de Alemania o Francia que tienen un 30% y a la de Italia con un 29%.

El aprovechamiento racional de los residuos de los bosques es, por tanto, unas tarea importante si se desea aminorar el número y los efectos de los incendios forestales y contribuir a la generación de energía en un país fuertemente deficitario de ella. Un obstáculo para este fin energético y una ventaja para evitar los incendios es que los bosques españoles son de los menos densos de Europa, solamente superados por Grecia en el menor número de metros cúbicos de madera por Hectárea.

La energía hidráulica, como ya se ha visto, es la más utilizada hasta ahora de las energías renovables. El potencial total del ciclo hidrológico mundial es de 3,84 TW muy superior al consumo humano.

Su distribución se da en la forma indicada en la Tabla-34, tomada del XIII Congreso de la Conferencia Mundial de la Energía, de Octubre de 1986.

Tabla-34

Potencial hidroeléctrico mundial.

Regiones	Potencial Teórico GW	Potencial Recuperable GW	Potencial Actual GW	Potencial en construcción GW	Potencial en proyecto
Africa	146,8	12,8	2,5	0,8	5,4
Norteamérica	711,8	361,1	71,0	1,0	5,7
Centro y Sudamérica	1.033,5	173,2	30,5	29,5	163,5
Asia	1.242,3	319,9	31,8	13,9	17,8
Oceanía	34,5	5,5	4,1	0,3	0,1
Europa	270,2	103,0	57,0	4,9	17,4
Antigua URSS	456,2	443,4	23,4	9,3	15,4
Total	3.895,3	1.418,9	220,3	63,7	225,3

El potencial recuperable es sólo algo más de la tercera parte del potencial teórico y el total del potencial actual, en construcción y en proyecto, es también algo más de la tercera parte del potencial recuperable.

Las mayores posibilidades están en Asia y en Sudamérica, seguidas muy de lejos por la antigua Unión Soviética. Sin embargo, los mayores porcentajes de utilización, es decir, los que más han desarrollado su potencial hidráulico son Europa y Norteamérica, con el 20 y el 10% aproximadamente. En construcción y proyectos son, por el contrario, Centro y Sudamérica y Asia los que hacen actualmente los mayores esfuerzos.

El potencial hidroeléctrico incluye el agua fluyente, los embalses y centrales de bombeo, las centrales mareomotrices y los artificios para recuperar la energía de las olas, de las corrientes marinas y de las diferencias de temperatura entre las aguas superficiales y profundas.

De todas estas formas las únicas que tienen importancia son las del agua fluyente y embalsada, sobre todo esta última. Las restantes son, por ahora, más posibilidades que realizaciones, aunque su potencial cuando se disponga de instalaciones realmente prácticas y no puramente experimentales es realmente importante.

La construcción de grandes embalses y de las llamadas minicentrales está, sin embargo, encontrando dificultades por parte de la opinión pública, aunque sigue aumentando en aquellos países que disfrutan de mayores recursos.

Una forma interesante que adquirió cierta popularidad hace años es la mareomotriz, de la cual hay varias instalaciones experimentales en el mundo en aquellos lugares en que la altura de las mareas y la extensión de los estuarios hacen imaginable la explotación. En la figura 31 se indican algunos de los emplazamientos potenciales, con inclusión de las instalaciones de Kislaya Guba, en Rusia, inaugurada en 1968 con una potencial de 0,4 MW, la de Jiangxia en China, de 3 MW, que funciona desde 1980 y la de Annapolis en Canadá, de 20 MW, operativa desde 1985, así como la más conocida de La Rance en la Bretaña francesa que con 24 turbinas y una potencia de 240 MW es la

mayor y más antigua de todas pues fue inaugurada en 1966. Produce anualmente unos 600 millones de KWh con 2.500 horas de funcionamiento al año.

Conseguir el dominio de las olas ha sido una ilusión de todos los hombres pasados y actuales. El número de dispositivos ensayados ha sido muy grande. Los dispositivos corresponden en general a tres tipos que extraen la energía de las olas por transporte de agua, por movimiento de la superficie y mediante la oscilación de una columna de agua, como se señala en la figura 32.

Las perspectivas teóricas son extraordinariamente interesantes, porque por metro lineal del frente de olas se podrían obtener hasta 92 KW, estimándose una media mundial de unos 35 KW por metro.

Los valores de distintos mares y océanos se encuentran en la figura 33.

Una de las últimas grandes instalaciones denominada Osprey construida en Inglaterra, que tenía un peso de 11.500 toneladas, se hundió en 1995 sin llegar a funcionar cuando era remolcada a su emplazamiento definitivo.

El resto de las utilizaciones de la energía de los mares quedan por el momento en la especulación.

Como ya se ha mencionado, el Sol es la fuente de todas las energías renovables, con ayuda de la Luna en la mareomotriz, y de todos los combustibles fósiles, excepto si así se consideran a los que dan origen a la energía nuclear.

A su vez el Sol es un gran reactor nuclear de fusión, que sigue el ciclo de Bethe según el cual cuatro núcleos de Hidrógeno se unen para formar un núcleo de Helio.

El Sol, formado hace unos 4.500 millones de años está en la zona media de su vida y se estima que durará otros tantos. La cantidad de energía que llega a la Tierra es de 1.000 a 1.200 Watios por metro cuadrado, aunque el flujo de energía llamado constante solar es de $1.367 \pm$ Watios por metro cuadrado.

El 46% de la energía está formada por luz visible, el 49% infrarroja y el 5% ultravioleta.

La masa del Sol es de $2 \cdot 10^{27}$ toneladas y su diámetro 1,39 millones de km. Se comporta como un cuerpo negro a 5.800 K y teniendo en cuenta la distancia a la Tierra de 149,5 millones de km la luz tarda desde el Sol unos 8 minutos.

Las reacciones nucleares del ciclo de Bethe tienen lugar en el núcleo del Sol, origen de la energía, a temperaturas superiores a los 10 millones de grados y una presión y densidad altas, todas las cuales van disminuyendo hasta la superficie, pasando primero por la fotosfera, origen de la radiación y después por la cromosfera y finalmente por la corona.

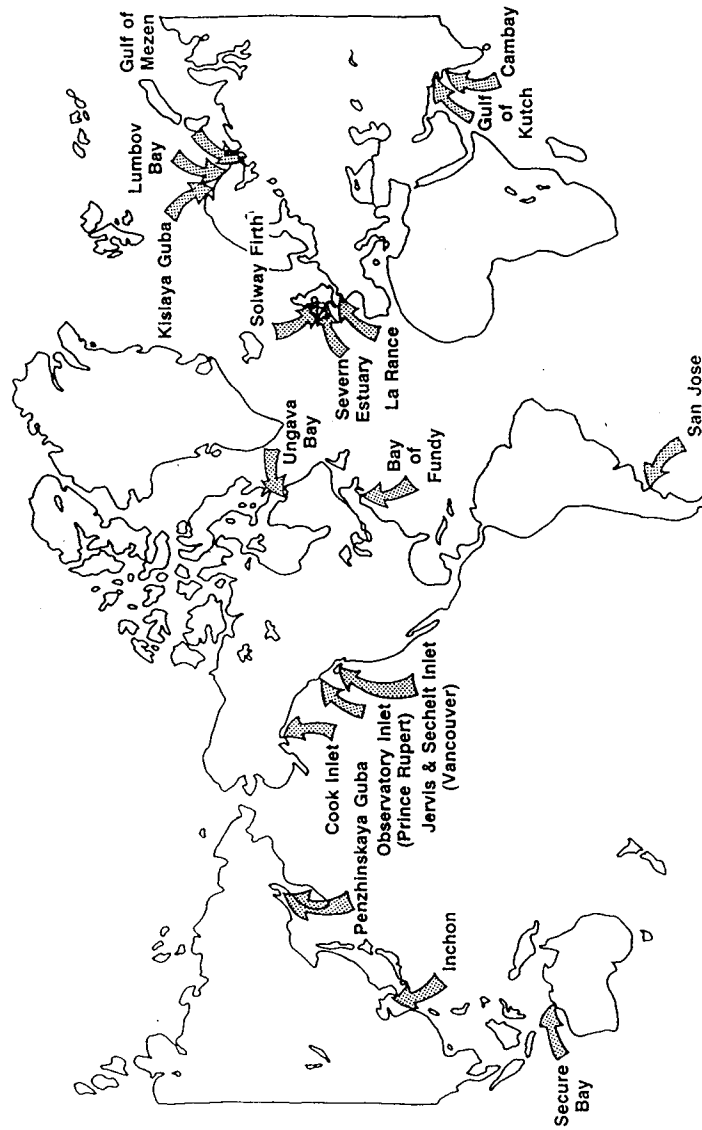
La distribución de densidades, presiones y temperaturas se da en la Tabla-32, en función de la distancia al centro del Sol.

La inmensa cantidad de energía que recibe la Tierra del Sol bastaría para solucionar todos los problemas energéticos del mundo si se pudiera aprovechar con un rendimiento aceptable o se pudiera almacenar.

Atendiendo a este último aspecto, que es general para la energía, los sistemas conocidos pueden ser clasificados de la forma dada en la Tabla-33, según el tipo de energía involucrado.

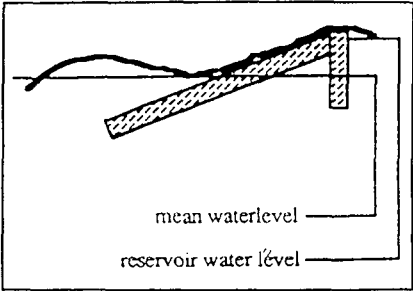
Potential tidal power sites

Tidal power is obtained from the filling and emptying of a bay or an estuary that can be closed by a dam.

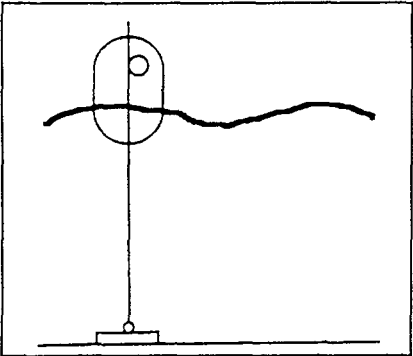


Source: After Clark, 1979

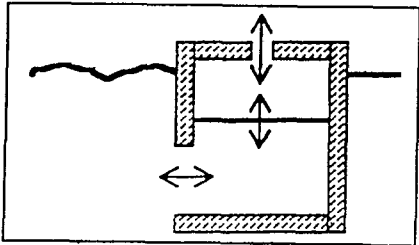
Figura 32



Wave energy extraction by water transport.



Wave energy extraction from the motion of the surface.



Oscillating water column

Figura 33

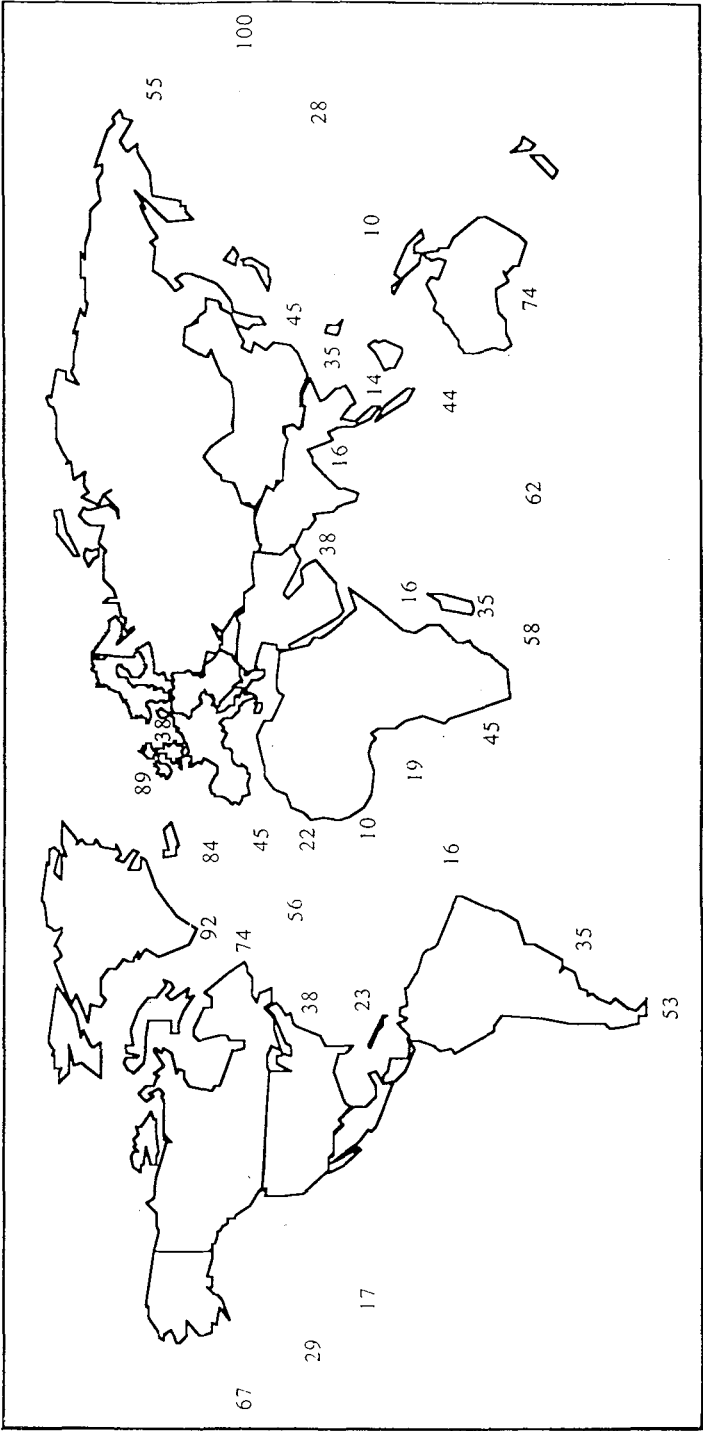


Tabla-32

Características del Sol

Distancia Km	Densidad g/cm ³	Presión Bar	Temperatura K
	160	10 ³ M	15 M
140.000	41	10 ⁻²	10 M
350.000	1		3,4 M
490.000	0,08		1,2 M
696.000	≅ 0	≅ 0	6.000

Tabla-33

Formas de almacenamiento de la energía.

<u>Energía</u>	<u>Sistema</u>
Mecánica	Centrales de bombeo, aire comprimido, volante de inercia.
Eléctrica	Acumuladores (baterías), pilas
Química	Hidrógeno, Biomasa (fotosíntesis).
Termoquímica	Reacciones químicas reversibles.
Térmica	Captadores

Como es bien sabido, ninguno de estos sistemas es eficaz suficientemente para considerar el problema resuelto prácticamente.

Solamente la Naturaleza, por medio de la biomasa, es capaz de hacerlo en gran cantidad, aunque el rendimiento total sea ínfimo. Como dijo hace años el recientemente fallecido premio Nobel, Abdus Salam, al hablar de la energía solar “la solución del problema vendrá, no de los captadores, sino de la Física cuántica, de la Bioquímica y de las tecnologías de los siglos XX y XXI”.

Desde el punto de vista de la energía solar utilizada de manera directa hay tres formas de hacerlo, como energía térmica, como energía fotovoltaica y pasivamente en invernaderos y edificios.

La gran dilución de la energía solar exige su concentración para la mayor parte de sus aplicaciones. Solamente en los invernaderos y edificios se emplea sin concentración mediante la orientación y situación adecuadas de los muros y mediante otros medios auxiliares como vidrios absorbentes, dobles paredes y circulación del aire y materiales de construcción especiales. Conviene aquí recordar que casi 1/3 de la energía primaria en los país desarrollados se dedica a las necesidades energéticas de las edificaciones. Las necesidades de calefacción y agua caliente suponen entre el 20 y al 50% de la energía consumida en los grandes edificios y los 2/3 en los edificios normales. Una buena parte de ellas pueden ser obtenidas mediante paneles solares, si se puede disponer de la superficie necesaria y el clima lo permite. En cambio, la utilización de paneles solares

para obtener refrigeración por medio de instalaciones de absorción, Rankine o cualquier otra, incluso parcialmente, no es económica frente a la convencional.

En las zonas frías la utilización de sistemas mixtos para calefacción y agua caliente tiene problemas de funcionamiento y de complicación de control de la instalación que la hacen poco práctica para los usuarios normales.

La concentración de la luz solar para obtener temperaturas más elevadas puede lograrse mediante espejos o lentes, adoptando variadas geometrías como se esquematizan en la figura 34. De ellas la más utilizada son los espejos parabólicos, que se enfocan hacia una zona o punto común para calentar agua u otro medio calo-portador, como mezclas de sales, si se desean temperaturas más altas sin aumento de la presión. Los sistemas prácticos requieren sistemas de estructuras soporte, seguimiento del Sol y mantenimiento. Un desarrollo interesante de coste reducido es el empleo de espejos depositados sobre membranas flexibles tensadas.

La forma más prometedora de empleo de la energía solar es la fotovoltaica, la generación directa de electricidad por medio de semiconductores, asociados, uno de tipo n con otro de tipo p, formando células, algunos de cuyos tipos aparecen en la figura 35. Se utilizan capas finas, generalmente de Silicio dopado, en forma de oblea, cinta o película fina o gruesa.

El Silicio suele ser mono y policristalino o amorfo, pero para absorber zonas diferentes del espectro o mejorar la eficacia de absorción de la luz se han ensayado otros elementos como Germanio y multitud de compuestos binarios (sulfuros arseniuros, fosfuros, telururos, antimoniuros y óxidos de Indio, Galio, Zinc, Cadmio, Cobre y Aluminio) y ternarios (sulfuros de Cobre y Zinc, seleniuros de Cobre e Indio y de Cobre y Galio, fosfuros de Silicio y Zinc y arseniuro de Silicio y Cadmio)

La eficacia práctica de las células o celdas solares es relativamente baja, lo que unido al valor de la materia prima, da costes altos del Watío pico producido, como puede comprobarse en la Tabla-34.

Los datos anteriores están razonablemente de acuerdo con la mayor y más moderna fábrica de obleas de Silicio policristalino montada por Bayer en Freiberg, antigua Alemania oriental, para producir anualmente unos 6 millones de obleas ahora y 16 probablemente en el año 2000 con un coste del panel de unos 4,1 dólares por Watío.

Las aplicaciones actuales son para iluminación en zonas aisladas o boyas, calculadoras, telecomunicaciones y análogos, pero hay ya un mercado inmediato en iluminación de carreteras y autopistas, bombeo de agua y en edificios. Una aplicación curiosa es la utilización de las barreras antirruídos para, mediante instalación de paneles fotovoltaicos, obtener la electricidad necesaria para la iluminación de autopistas. Otra igualmente útil en países cálidos es el empleo de la tapa del techo de coches para activar un ventilador que enfría el coche cuando queda expuesto al Sol.

La instalación completa incluye, además de las estructuras soporte, y el seguimiento del Sol como en la utilización térmica. Aquí es mucho más importante el mantenimiento, consistente en la limpieza de las superficies para evitar su ensuciamiento y el depósito de sólidos y para sustituir los módulos que puedan romperse por granizos u otras causas. Las conexiones eléctricas y la conversión de corriente continua en alterna y la transformación a tensiones normales son aquí también necesarias, así como alguna forma de almacenamiento que suele ser en forma de baterías, aunque se ha sugerido como opciones posibles la electrolisis del agua y el almacenamiento de Hidrógeno para producir electricidad de noche mediante una célula de combustible.

TABLA 34

Comparación de características de celdas fotovoltaicas.

Material	Eficacia Teórica,¹ %	Eficacia de Laboratorio,² %	Eficacia Comercial, %	Coste,³ Dólares por Watio pico
Silicio mono-cristalino	30	23,5	12 – 14	4 – 7
Con concentrador	37	28,2	13 – 15	5 – 8
Silicio policristalino	25	17,8	11 – 13	4 – 7
Silicio amorfo (incluyendo aleaciones de Silicio)	17	13	4 – 6	3 – 5
Telururo de Cadmio policristalino en película fina	27	15,8	6	n.d
Diseleniuro de Cobre e Indio	19	16,4	n.d	n.d
Arseniuro de Galio	28	27,6	n.d	n.d
con concentrador	39	29,2	n.d	n.d

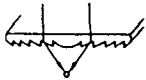
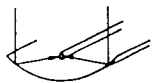
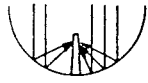
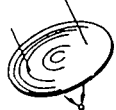
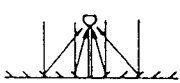
1. La eficacia teórica se evalúa a nivel terrestre a una latitud de 45°N y temperatura ambiente de 20°C.
 2. Eficacia de laboratorio es la relación de la energía eléctrica que produce una celda expuesta a la luz solar directa a la energía de la luz incidente sobre la celda.
 3. El coste se refiere a sólo el módulo solar y no refleja el balance del sistema que en la mayoría de los casos duplica aproximadamente el coste total.
- n.d no disponible.

En todo caso, las necesidades de superficie son grandes. Se estima que para una potencia de 100 MW se requiere una superficie de 2,5 km cuadrados y en el mundo habría instalados, según datos del World Watch Institute de 1995, un total de 81,4 MW.

La energía renovable que ha adquirido mayor auge en los últimos tiempos ha sido otra de las más antiguas, la eólica, que, aunque utilizada antes para obtener principalmente energía mecánica, ahora se emplea preferentemente para generar electricidad y en el campo para el almacenamiento y transporte de agua.

En el año 1995 había instalados en el mundo 4.880 MW eólicos de los cuales 115 correspondían a España. En Europa la potencia instalada mayor correspondía a Alemania con 1.137 MW, seguida de Dinamarca con 630, Holanda con 250 y Reino Unido con 193. Pero los planes de crecimiento son grandes. Los proyectos en diversas fases de ejecución en nuestro país significan un incremento a comienzos de este año de 820 MW, con lo que no es difícil prever que en el año 2000 se alcanzarán los 1.000 MW de potencia instalada.

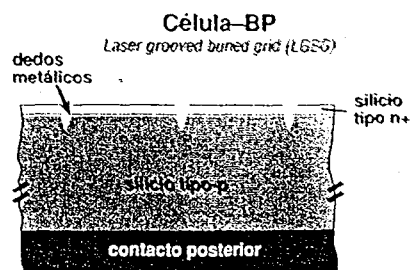
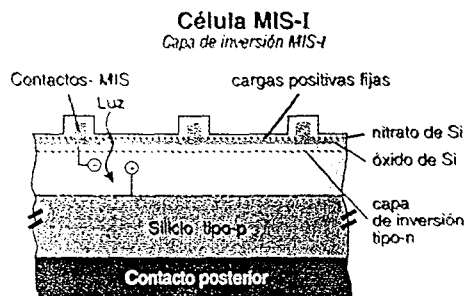
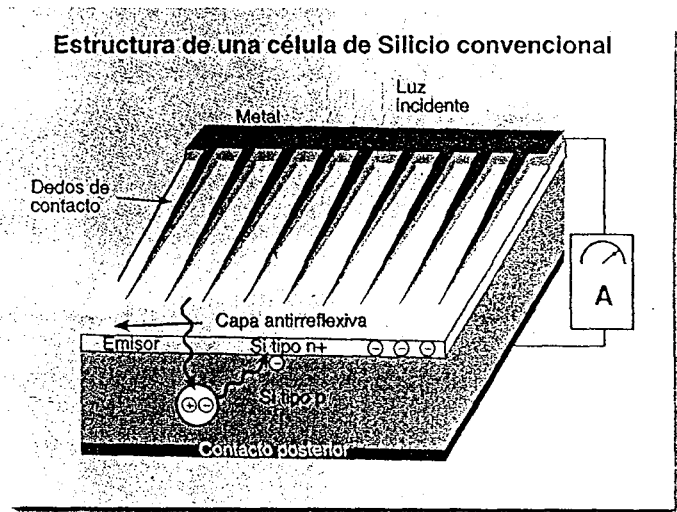
Figura 34

MOVEMENT TYPE	COLLECTOR TYPE	CONVERSION TYPE
SEASONAL ADJUSTMENT	COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR (CPC) $C_g = 1.5 - 10$ 	DISTRIBUTED
MOVEMENT AROUND TWO AXES (LINEAR FOCUS)	FRESNEL LENS $C_g = 10 - 40$ 	
MOVEMENT AROUND ONE AXIS (LINEAR FOCUS)	FIXED CONCENTRATOR WITH FACETED MIRROR $C_g = 20 - 60$ 	
	MULTIPLE CONCAVE ROTATING MIRRORS CENTRAL RECEIVER SYSTEM WITH LINEAR FOCUS $C_g = 20 - 80$ 	CENTRALIZED
	PARABOLIC TROUGH* $C_g = 20 - 100$ 	DISTRIBUTED
MOVEMENT AROUND TWO AXES (POINT CONCENTRATORS)	SPHERICAL BOWL $C_g = 100 - 300$ 	
	FRESNEL LENS $C_g = 100 - 1000$ 	
	CENTRAL RECEIVER SYSTEM OR CENTRAL TOWER $C_g = 100 - 1,000$ 	CENTRALIZED
	PARABOLIC DISH $C_g = 100 - 5,000$ 	DISTRIBUTED

(*) Some times used with two axes movement

Generic types of concentrators.

Figura 35



En el mundo las mayores proyecciones hacia el futuro se hacen en los Estados Unidos y en la India sobrepasando los 2.500 MW cada uno en el año 2005 y en Alemania y China cercanos a los 1.300 MW, si bien en todos los casos el crecimiento dependerá de la situación económica futura y del mantenimiento de las ayudas de todo tipo a las energías renovables.

Las principales dificultades técnicas de la energía eólica se deben al carácter intermitente del viento y a los cambios de su velocidad, que, por una parte, limitan su empleo —en España el tiempo medio de funcionamiento de las instalaciones está entre 2.200 y 2.300 horas al año, es decir, aproximadamente un 25% del tiempo— y, por otra, introducen perturbaciones en el sistema de generación de electricidad y riesgos que se tienen en cuenta en el sistema de autoprotección (frenado e interrupción del funcionamiento).

Como es previsible hay un mínimo y un máximo para la velocidad útil del viento y son necesarias una línea auxiliar de suministro eléctrico y un sistema de baterías para almacenamiento

Los progresos en las turbinas utilizadas ha sido grande gracias a un mayor conocimiento de la aerodinámica del proceso y de la transformación en electricidad y, sobre todo, de los avances en los materiales de construcción. Se ha pasado así de las turbinas de 25 ó 30 KW iniciales a las actuales de 500 KW, estando en desarrollo y proyecto potencias superiores.

Una posibilidad muy interesante, que abre un buen número de utilidades en muchos campos, es el acoplamiento de la energía eólica con otras energías renovables, como la fotovoltaica y la hidroeléctrica, para reducir su variabilidad frente a los agentes naturales y reducir sus necesidades de almacenamiento o ayuda exterior.

Energía nuclear

La energía nuclear ha traído tres aspectos muy diferentes: las explosiones, las centrales nucleares y el empleo de los isótopos en la investigación, la Medicina y en el desarrollo de una gama nueva de instrumentos de medida.

Históricamente, las explosiones sobre Hiroshima y Nagasaki en el Japón constituyeron una marca trágica y desgraciada que ha sido considerada como el pecado original de la energía nuclear, su baldón y su estigma para siempre.

Las centrales nucleares, a pesar de proporcionar un 16% de la electricidad del mundo o un 33% en la Unión Europea o en España, son miradas por muchos como una amenaza y un riesgo.

Se olvidan así los efectos de la utilización de los isótopos, que son, en mi opinión y en la de muchos otros científicos, la herramienta más importante para desvelar los secretos de los fenómenos de la vida, de nuestro origen y el origen del Universo y prácticamente de numerosas Ciencias. Y esto es lo que verdaderamente quedará como resultado del descubrimiento de la radiactividad y de sus aplicaciones.

No es este el momento, ni la oportunidad de presentar más en detalle esta idea, pero quede aquí aunque se trate ahora de presentar la generación de energía a partir de reacciones nucleares.

Ya quedó presentada anteriormente la diferencia en varios órdenes de magnitud con las reacciones químicas más exotérmicas de la energía puesta en juego por las reacciones nucleares. Las ideas acerca de su aprovechamiento surgieron pronto entre los científicos en todos sus aspectos, pero fue sólo después del 2 de Diciembre de 1942, cuando al funcionar el primer reactor nuclear hecho por el hombre en la Universidad de Chicago por un grupo de científicos dirigidos por Enrico Fermi, estas ideas atisbadas se hicieron realizaciones al alcance de la humanidad.

Las investigaciones hasta entonces habían logrado esclarecer numerosas reacciones empleando las partículas y radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas naturales y por los primeros aceleradores hechos por el hombre (Van de Graaf, Cockroft-Walton, ciclotrones y sincrotrones). Se puso así de manifiesto la diversa estabilidad de los núcleos de los elementos frente a las radiaciones de diferente energía y después del descubrimiento del neutrón a la de este y otras partículas.

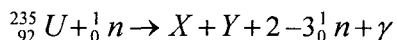
Se llegó así a prever los dos tipos de procesos factibles de transformación de una parte de la materia en energía, la fusión o unión de núcleos ligeros y la fisión o rotura de los núcleos más pesados.

Ocurre en las reacciones nucleares lo que en las reacciones de combustión, ya que no se conoce cómo hacer la conversión directa de la energía nuclear o química en electricidad. Hay que pasar por la forma más degradada de calor lo que se traduce en un rendimiento bajo, que como es bien sabido depende de las temperaturas de los focos caliente y frío. No hay, por el momento, en la utilización de la energía nuclear algo semejante a las celdas de combustible.

La clave de la fisión nuclear en sus inicios fue la confirmación de que en la fisión de uno de los dos isótopos que forman el Uranio natural (Uranio-238, 99,3%; Uranio-235, 0,7%), en el Uranio-235, cuando bombardeado con neutrones, producía en la fisión entre 2 y 3 neutrones, lo que constituía algo semejante a lo que los químicos denominaban reacción en cadena y hacía imaginable los dos caminos posibles de reacción controlada o incontrolada según se mantuviese constante la población de

neutrones o se dejase que creciera. Se vería después que ambos caminos requieren condiciones muy diferentes.

La reacción es así:



en que X e Y son fragmentos de masa y carga distinta cuando el neutrón incidente no tiene energías demasiado elevadas. Sólo en este último caso la fisión es simétrica.

Lo mismo que en las reacciones químicas para que haya reacción tiene que haber choque entre las moléculas, átomos o iones, en la reacción de fisión el neutrón tiene que estar dentro del núcleo del Uranio un tiempo suficiente, deducción que se confirmó experimentalmente por el mayor efecto de los neutrones de bajas energías que por los de altas. La fisión es sólo una de las posibles interacciones entre el neutrón y el núcleo, por lo que conviene trabajar en las condiciones más favorables para que la probabilidad de la fisión sea máxima. Se dice entonces que la sección eficaz de fisión del Uranio-235 es máxima cuando el neutrón es térmico, es decir, tiene una energía semejante a la de las moléculas de los gases a temperaturas del orden de las ambientales.

Esto significa que es preciso frenar los neutrones producidos en la fisión, del orden de varios Megaelectron-voltios, hasta 0,025 eV, lo que debe hacerse por choques en que la cesión de energía sea máxima, ya que el neutrón al no tener carga no puede ser frenado por otros medios. De ahí la necesidad de acoplar al Uranio -el combustible- una sustancia que frene los neutrones hasta el valor necesario -el moderador. Esta es una gran simplificación evidentemente, porque el fenómeno es más complicado, pero tiene aplicación en los reactores actuales al separar físicamente el combustible en elementos diferenciados separados por el moderador.

Dado que la población de neutrones debe ser constante en el núcleo del reactor en un momento dado, deben evitarse las pérdidas a través de la superficie exterior, lo que para un sistema cualquiera depende de la relación superficie a volumen e implica para ese sistema una determinada masa de combustible, la masa crítica, por debajo de la cual el sistema no llega a alcanzar el estado estacionario.

La energía producida por la fisión se distribuye principalmente entre los productos de fisión, los neutrones y las radiaciones de la fisión y de los productos de fisión, radiactivos. Toda esta energía se convierte finalmente en calor, que es necesario extraer para evitar un aumento continuo de la temperatura del sistema.

El control de la reacción se hace mediante elementos absorbentes de neutrones, que se insertan parcial o totalmente según se desee parar la reacción con una cierta deceleración o instantáneamente.

Al convertir este concepto en una instalación productora de energía la primera cuestión que se presenta es fijar los niveles de temperatura y presión de modo que se obtenga un rendimiento aceptable sin sobrepasar valores que puedan ser tecnológicamente compatibles con los materiales de construcción y otras circunstancias auxiliares a considerar. Deben buscarse temperaturas altas y hacer esta condición congruente con el resto de las consideraciones necesarias.

Resumiendo las consideraciones anteriores, un reactor nuclear debe tener los siguientes componentes:

Combustible
Moderador
Refrigerante
Elementos de control

y una vasija de presión donde se sitúen y por la que se circule y se extraiga el refrigerante para recuperar el calor.

Antes de seguir, conviene recordar que el Uranio no es el único combustible nuclear natural. Es sí el único que contiene un isótopo, Uranio-235, fácilmente fisiónable. Pero, el otro isótopo, Uranio-238 y todo el Torio existente en la Naturaleza, que solo contiene un isótopo, Torio-232, por absorción de neutrones, en un caso a través del intermedio Neptunio-239 y en el otro a través del Protactinio-233, se convierten en otros dos nuevos isótopos de propiedades semejantes en cuanto a fisión por neutrones del Uranio-235 natural que son el Plutonio-239 y el Uranio-233. Así, pues, disponemos de tres isótopos posibles como combustibles nucleares, si bien es necesario siempre partir de Uranio-235.

Como moderadores se pueden utilizar en estos reactores elementos o compuestos con baja masa atómica o molecular. Los más utilizados han sido hasta ahora Carbono, en forma de grafito, agua ligera (H_2O) y agua pesada, con Hidrógeno-2, Deuterio, en vez del Hidrógeno-1 del agua ligera. Como refrigerantes se han utilizado gases como el CO_2 y el Helio y líquidos como el agua ligera y el agua pesada, que así desempeñan una doble función.

Los elementos de control más empleados han sido el Boro en formas diversas, el Cadmio y el Gadolinio.

Otro tipo de reactores, llamados rápidos, se distinguen de los descritos, denominados térmicos, porque su diferencia esencial es que utilizan directamente los neutrones de alta energía producidos en la fisión para originar nuevas fisiones, sin necesidad de moderación. Por sus características físicas los reactores rápidos requieren una mayor concentración de isótopo fisiónable que los reactores térmicos. Mientras que estos últimos pueden funcionar con una concentración de Uranio-235 como la que se encuentra en el Uranio natural, aunque ello tenga sus limitaciones, la concentración empleada en la práctica no llega al 5%. Por el contrario, los reactores rápidos emplean concentraciones de Uranio-235, de Plutonio-239 o de Uranio-233 de hasta el 90%.

En estos no hay moderador. Se emplean como refrigerantes metales líquidos, casi siempre Sodio o algunas de sus aleaciones.

Esta diferencia en el distinto fluido caloportador es también importante. Cuando se emplea agua ligera o pesada hay dos opciones posibles. De acuerdo con la ley de las fases si en el reactor se genera vapor de agua, al haber dos fases, establecida la presión, la temperatura del sistema queda fijada. Por el contrario, si el sistema es siempre líquido, las dos libertades del sistema indican una variación independiente de la presión y la temperatura. Se utiliza entonces un elemento anexo al sistema, el presionador, donde se obtiene una burbuja de vapor y así se fijan ambas variables. Se habla así de reactores de agua en ebullición y de reactores de agua a presión.

En estos reactores de agua el límite práctico de presión en la vasija supone una temperatura del vapor de agua producido, directamente en el caso de los de agua en ebullición o en el generador de vapor, un cambiador de calor, en los de agua a presión, que es relativamente baja y además se trata de vapor saturado, no recalentado. Se obtiene

así un rendimiento relativamente bajo y es necesario emplear turbinas de gran tamaño semejantes a las empleadas en las primeras centrales térmicas.

Los reactores que emplean metal líquido tienen la doble ventaja de no necesitar presiones altas y de poder obtener vapor de agua de temperatura más alta.

Si se piensa en el número de combustibles, moderadores y refrigerantes son posibles un gran número de tipos de reactores, si bien muchas de esas combinaciones no han sido ni siquiera ensayadas. Los reactores, exceptuando los de investigación, que funcionan actualmente en el mundo, pertenecen a los dados en la Figura 36, donde se muestran sus características más importantes.

Es también destacable que los reactores nucleares no generan sólo electricidad. En algunos se utilizan como fuentes de calor, de radiación, de propulsión marina y para transmutar elementos, como se indica en la Tabla 35.

Tabla 35

Empleo de los reactores nucleares de fisión

. PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD
Centrales nucleares
Usos aeroespaciales (Pu-238)
. PRODUCCIÓN DE CALOR
Calefacción
Procesos químicos
Desalación
. IRRADIACIONES
Isótopos (Tritio, Cobalto-60)
Neutrones
. TRANSMUTACIÓN
Uranio-238 (Plutonio-239)
Torio (Uranio-233)
Transuránicos
. PROPULSIÓN
Submarinos
Barcos

En la práctica en vez de la vasija de presión algunos tipos utilizan tubos de presión. En ambos casos, los reactores de agua a presión y los reactores rápidos, tienen tres circuitos, el primario compuesto del reactor, la bomba de circulación y el generador de vapor, el secundario, que consta del generador, lado externo de los tubos, la turbina, el condensador y la bomba de circulación, y el tercero, agua del exterior, que condensa el vapor procedente de la turbina.

En cambio, en los de agua en ebullición, el primario consiste en el reactor, la turbina, el condensador y la bomba de circulación. El secundario es el de refrigeración del condensador semejante al del otro tipo del reactor.

El circuito primario en los reactores de agua a presión y el reactor en los de agua en ebullición están situados dentro de la contención, un edificio de acero de varios cm de espesor y rodeado de más de 1 m de hormigón. Dentro de la contención hay entre otros dispositivos una instalación de rociado de la atmósfera interior para el caso imprevisible de fugas del primario; la lluvia condensaría el vapor y arrastraría la mayor parte de los productos de fisión con lo que se reduciría la presión del interior de la contención. En algunos casos, se montan dispositivos de alivio de la presión tras el paso por filtros de variados sistemas.

El edificio de contención de los reactores de agua a presión suele adoptar una forma cilíndrica y en la parte superior semiesférica o más aplanada. En los de agua a presión se han adoptado formas cilíndricas, troncocónicas y más elaboradas, como pueden comprobarse en la Figura 37.

Un sistema que diferencia las centrales nucleares de las térmicas es el relativo al de la refrigeración continuada del núcleo del reactor tanto en la parada como en caso de accidente. Aunque se pare el reactor es preciso continuar extrayendo el calor que producen al desintegrarse todas las sustancias radiactivas contenidas en el núcleo. El sistema especial que lo hace normalmente es el de extracción del calor residual.

En condiciones anormales, como se explica en la Figura 38, aparecen sucesivamente y de manera automática cinco sistemas, todos ellos con la misión de que el núcleo del reactor esté siempre cubierto de agua y refrigerado. Son el acumulador a presión, el sistema de inyección a alta presión, el sistema de baja presión, el rociado de la contención y la recirculación del agua de los tres primeros sistemas, que para aumento de las condiciones de seguridad contienen Boro disuelto.

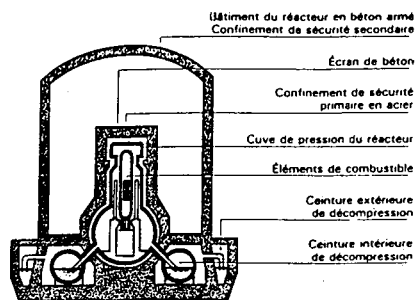
Los sistemas de control del reactor estaban inicialmente basados en la parada del reactor tan pronto se rebasaban ciertos valores de las numerosas y diferentes variables que intervienen, dando lugar a un número elevado de paradas automáticas no programadas, a veces llamadas disparos. Hoy en día el uso de una instrumentación más fiable y precisa, de una informatización muy mejorada y de la experiencia de más de 30 años de funcionamiento de muchos reactores ha conducido a una instrumentación que ofrece síntomas y tendencias mediante ordenadores y representaciones gráficas que no requieren en muchos casos la parada. Los sistemas actuales permiten el seguimiento de la demanda que asigna el distribuidor nacional a una central determinada y no requiere necesariamente el funcionamiento en base, que, a pesar de todo, es conveniente por presentar las centrales nucleares el coste más bajo de operación de todos los combustibles.

Figura 36

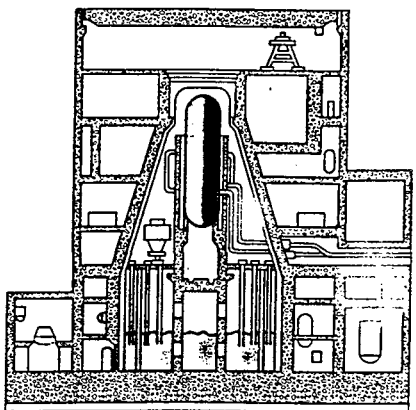
Nuclear Power Reactor Types: Typical Characteristics

	PWR	BWR	GCR	AGR	PHWR (CANDU)	LWGR (RBMK)	FBR
Active core height, m	4.2	3.7	7.6	8.3	5.9	7.0	1.0
Active core diameter, m	3.4	4.7	14.0	9.3	6.0	11.8	3.7
Fuel inventory, tonnes	104	134	300	110	90	192	32
Vessel type	Cylinder	Cylinder	Cylinder	Cylinder	Tubes	Tubes	Cylinder
Fuel	UO ₂	UO ₂	U	UO ₂	UO ₂	UO ₂	PuO ₂ /UO ₂
Form	Enriched	Enriched	Natural	Enriched	Natural	Enriched	—
Coolant	H ₂ O	H ₂ O	CO ₂	CO ₂	D ₂ O	H ₂ O	Sodium
Steam generation	Indirect	Direct	Indirect	Indirect	Indirect	Direct	Indirect
Moderator	H ₂ O	H ₂ O	Graphite	Graphite	D ₂ O	Graphite	None

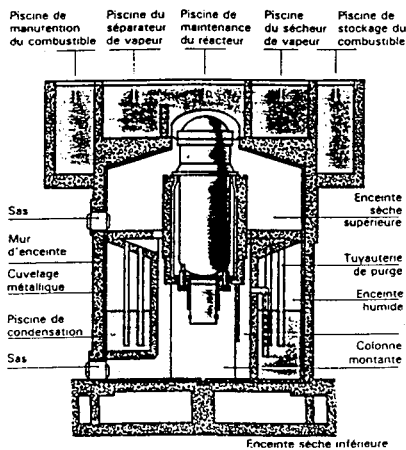
Figura 37



CONFINEMENT TYPE MARK I

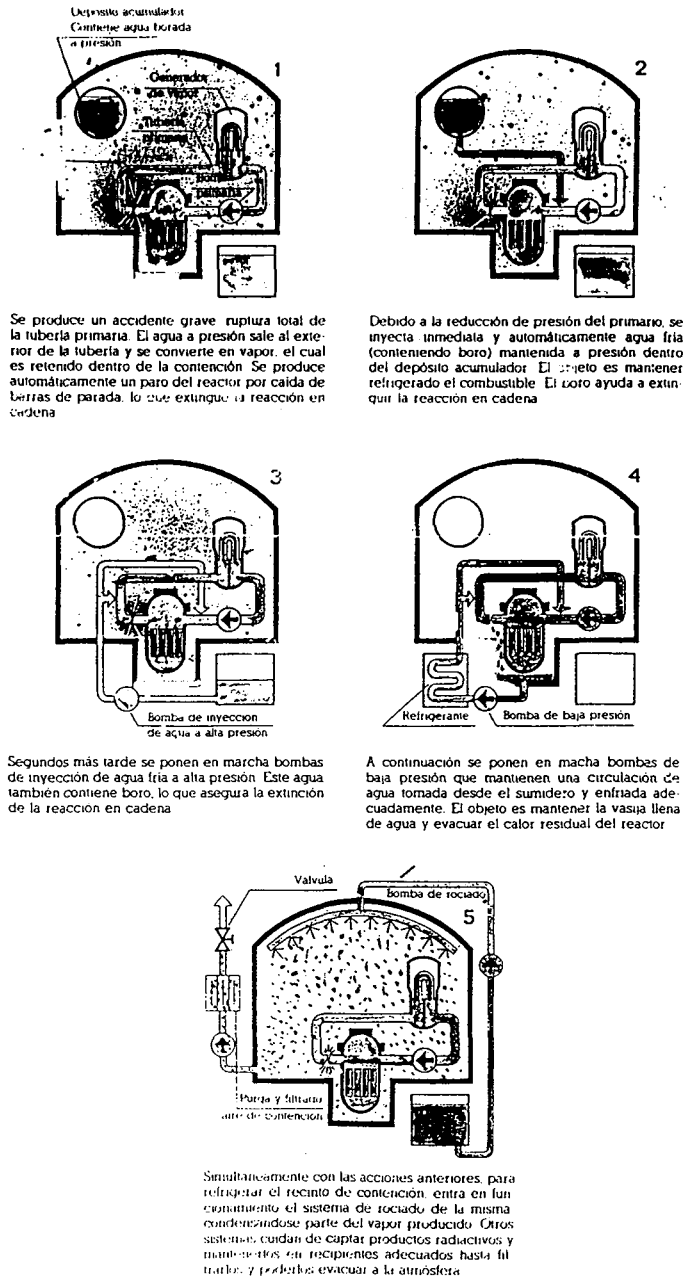


CONFINEMENT TRONCONIQUE MARK II



CONFINEMENT TYPE MARK III

Figura 38



El personal de operación para adquirir la licencia necesaria debe pasar por un largo y concienzudo periodo de formación específica, que incluye un entrenamiento en simulador, de manera semejante al de los pilotos de aviones, y la renovación de la licencia exige, así como su concesión, nuevos exámenes y reunir condiciones físicas y psíquicas suficientes.

Con ello se ha conseguido que el funcionamiento de las centrales nucleares sea muy semejante al de una central térmica, a la cual se asemejan según se hace notar en la Figura 39.

Las configuraciones de los distintos conceptos de central nuclear, cuyas características más importantes se dieron en la Figura 36, responden a soluciones técnicas que dependen principalmente del tipo de reactor elegido, de las condiciones de funcionamiento, principalmente presión y temperatura, y del medio elegido para la recuperación del calor.

Los primeros modelos se derivaron de los programas militares, bien para la obtención de materiales fisionables aptos para la preparación de armas, bien para la propulsión de submarinos.

Fruto de los primeros fue el reactor de uranio natural-grafito-gas, esquematizado en la figura 40, del que quedan en funcionamiento solamente unas pocas unidades, esencialmente en el Reino Unido, estando las restantes, entre otras la española de Vandellós-1, en proceso de desmantelamiento por razones de orden económico.

La propulsión dio origen a las centrales de agua a presión, designadas como PWR, véase la figura 41, e indirectamente a las de agua en ebullición, BWR, figura 42.

Un modelo especial ruso, denominado RBMK, iniciales de reactor de gran potencia de agua en ebullición, Reactor Bolchoi Mochtechnosti Kipiachtchi, y tristemente conocido por el accidente de Chernóbil, fue desarrollado como extensión de la primera central nuclear del mundo que fue la soviética de Obninsk. Hasta el accidente, este tipo de central presentaba, según los diseñadores, la ventaja de su carácter modular y había funcionado normalmente. Sólo después se reconocieron los defectos del diseño y de la preparación de los operadores soviéticos, cuya conjunción en el experimento que estaban realizando dio origen a este grave accidente. Su esquema aparece en la figura 43.

Para escapar de la necesidad de enriquecer el combustible en Uranio-235 hasta concentraciones del orden del 2,5 al 4%, los canadienses utilizaron en gran escala el agua pesada, con lo que puede utilizarse Uranio natural, y de ahí surgió otro de los tipos actualmente utilizados, el Candu, cuya geometría es de tubos de presión horizontales y que conserva el sistema de recarga continua de combustible nuevo, como se indica en la figura 44.

Otro modelo que continuaba la refrigeración por gas, en este caso Helio, y la asociaba con la obtención de altas temperaturas era el llamado reactor de gas y alta temperatura, HTGR, véase figura 45, no mencionado en la figura 35. En la figura 45 se dan sus principales características, un esquema simplificado de la instalación completa de generación eléctrica y lo más destacable por su novedad, la fabricación del combustible, donde pueden apreciarse las posibilidades de reproducción mediante el empleo del combustible enriquecido al 19,9% en Uranio-235 y la alternativa de Torio para obtener Uranio-233 o de Uranio natural para obtener Plutonio-239.

A pesar de su mayor rendimiento energético, por diversas causas, este modelo de reactor no pasó de la fase de prototipo.

Figura 39

CENTRALES TERMICAS Y NUCLEARES

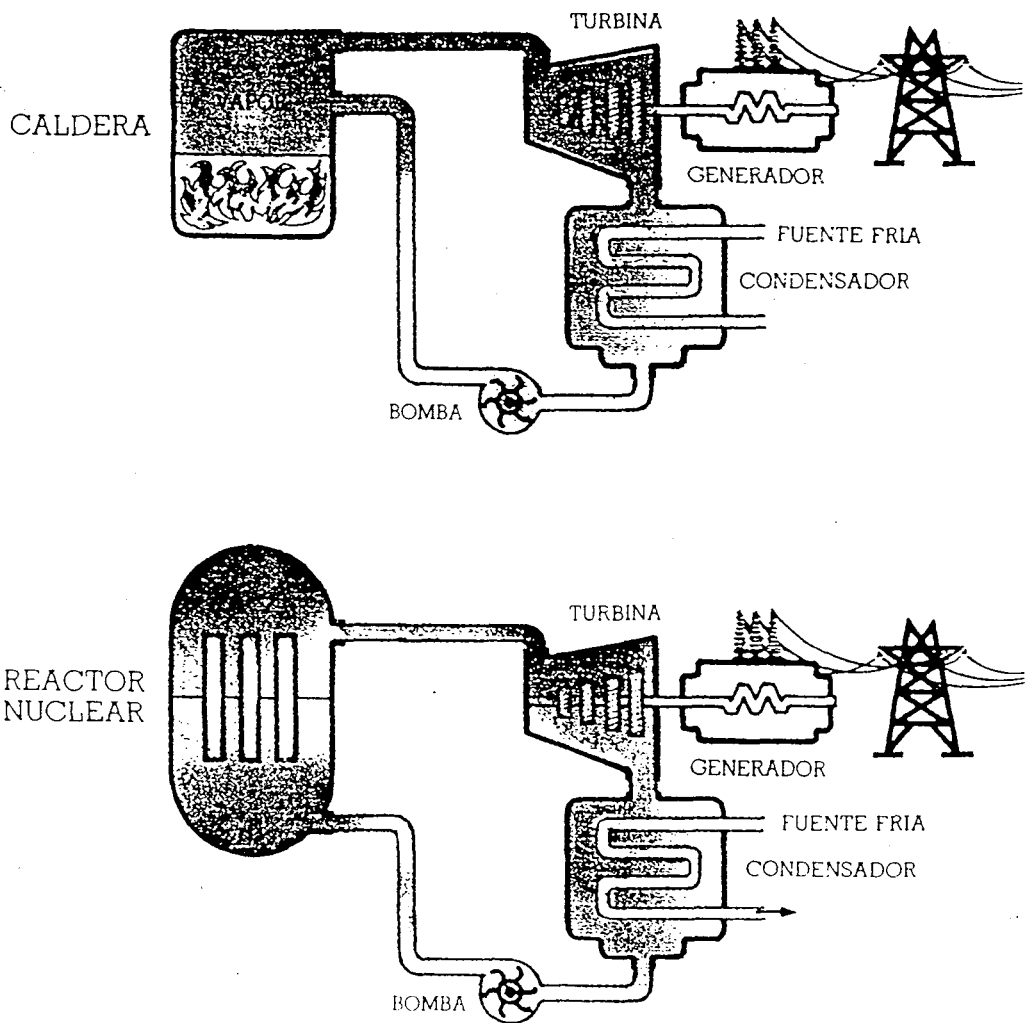


Figura 40

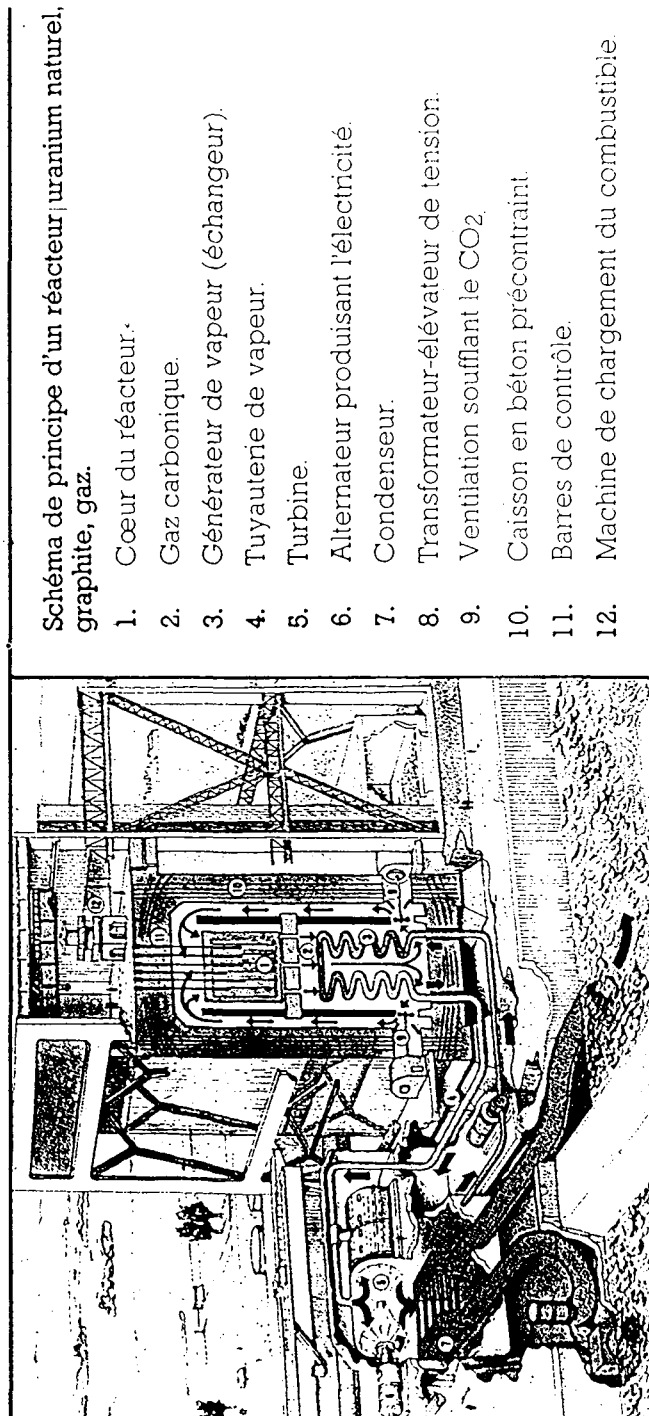
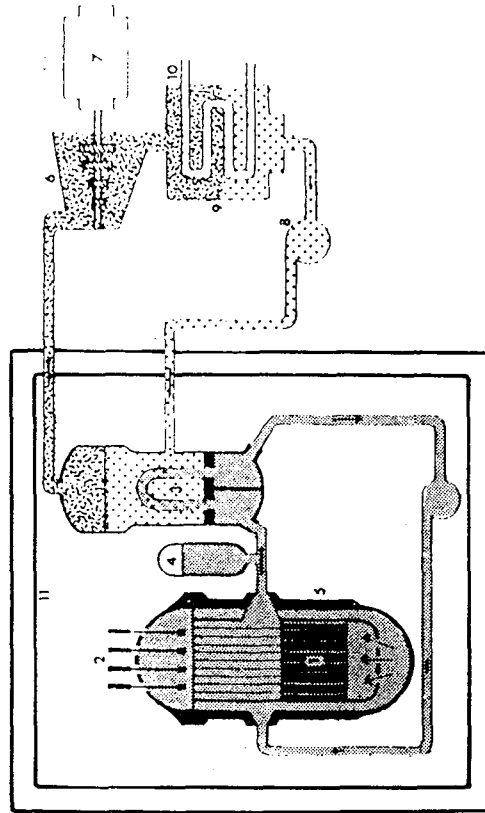


Figura 41

ESQUEMA DE UNA CENTRAL CON REACTOR PWR
(Agua a presión)

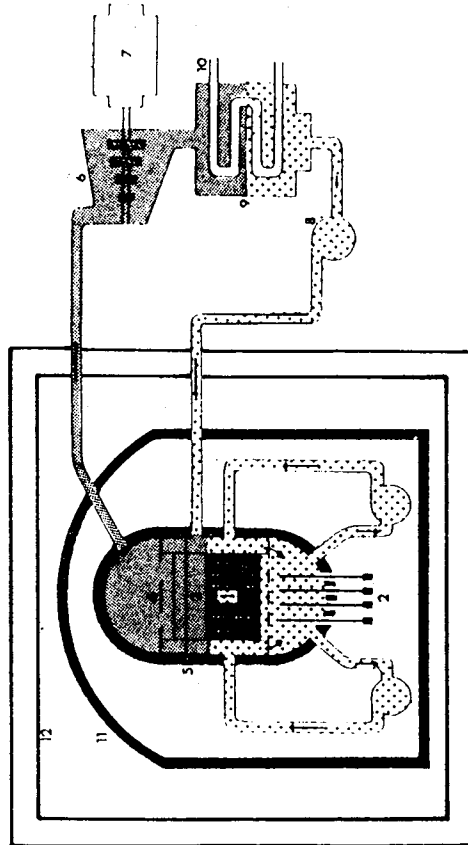


1. Núcleo
2. Barras de control
3. Generador de vapor
4. Presionador
5. Vasilija
6. Turbina
7. Alternador
8. Bomba de condensado
9. Condensador
10. Agua de refrigeración
11. Contención de hormigón

— Circuito primario
 Vapor
 - - - - - Agua

Figura 42

ESQUEMA DE UNA CENTRAL CON REACTOR BWR
(Agua en ebullición)



1. Núcleo
2. Barras de control
3. Filtro
4. Secador
5. Vasillo
6. Turbina
7. Alternador
8. Bomba de condensado
9. Condensador
10. Agua de refrigeración
11. Contención de acero
12. Contención de hormigón

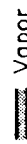
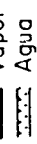
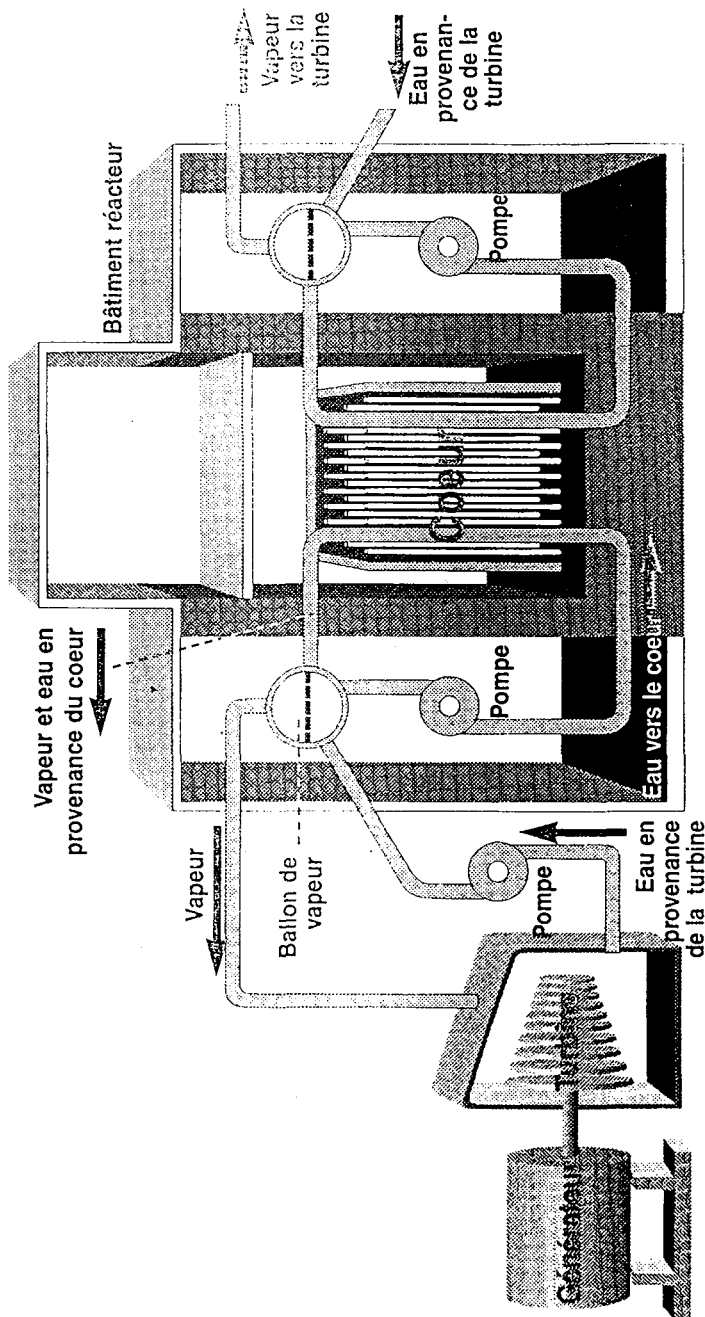
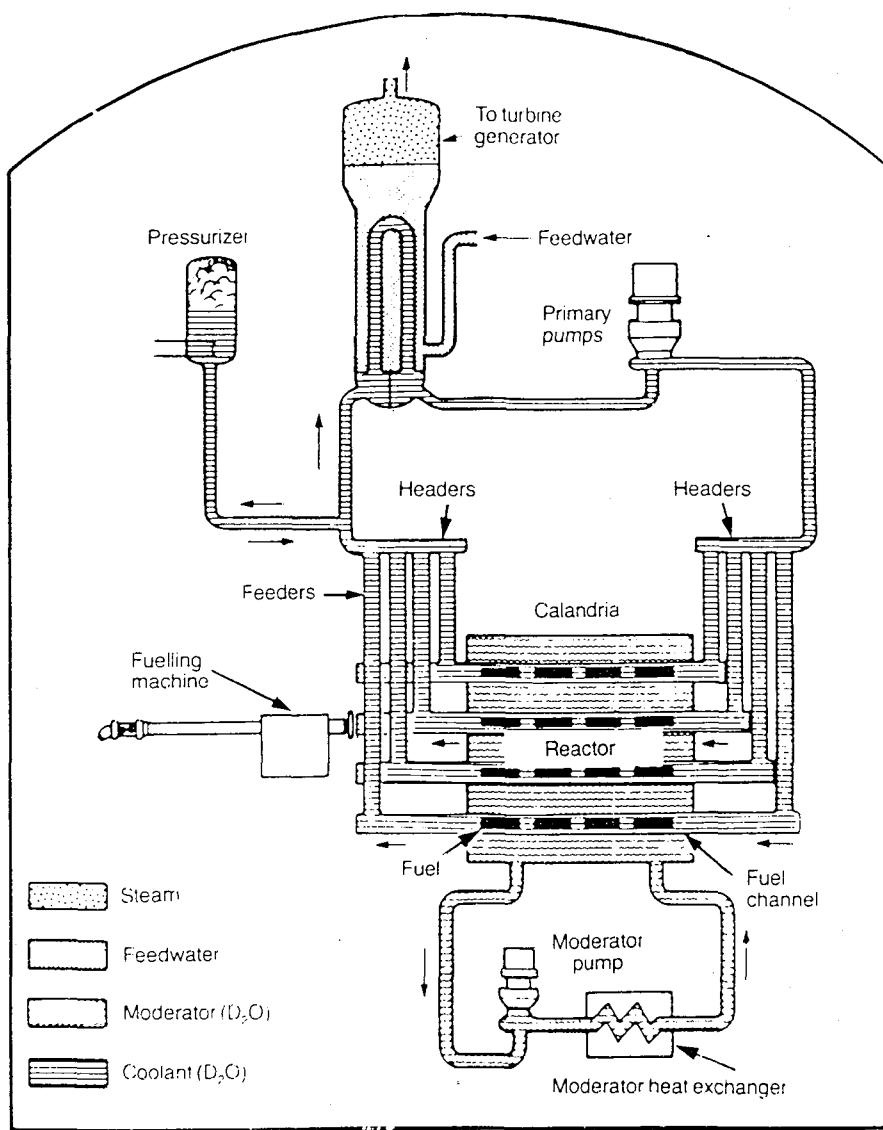
 Vapor
 Agua

Figura 43



RBMK
 Reactor Bolchoi Mochtnosti Kipiatchi
 (Reactor de Gran Potencia de agua en ebullición)

Figura 44



CENTRAL NUCLEAR CANDU

URÂNIO NATURAL

ÁGUA PESADA

Finalmente, hay que destacar el modelo de reactor destinado a la producción de más combustible fértil que el que consume, el reactor reproductor. Este ideal antiguo del ave que renace de sus cenizas ha dado nombre al prototipo francés Phenix, para el que los diseñadores franceses eligieron el sistema basado en el Uranio-235 como combustible inicial y el Uranio natural o empobrecido como material fértil para la obtención de Pu-239. Otros reactores semejantes en la antigua Unión Soviética y en el Reino Unido siguieron esta misma línea y sólo la India desarrolla el empleo del Torio para obtener Uranio-233.

La diferencia esencial entre ambos casos es la posibilidad que ofrece el Uranio-233 de poder obtenerse la reproducción en un reactor térmico, es decir, con moderación de los neutrones, mientras que el Uranio-235 o el Plutonio-239 requieren reactores rápidos.

En los que se sigue la línea del Uranio-235 se hace necesario el empleo de un metal líquido, lo que, a su vez, tiene la ventaja de no exigir el uso de presiones altas, pero el riesgo de la reacción Sodio-agua, mayor en el caso del Sodio radiactivo, complica la situación y de ahí la solución adoptada en Francia de intercalar entre el circuito primario por donde circula el Sodio radiactivo y el circuito de agua que pasa a través de la turbina, un circuito intermedio de Sodio no radiactivo. Tal es el esquema que aparece en la figura 46.

El número de modelos que se instalan comercialmente es ahora muy reducido. Son tres y de ellos compiten entre sí dos, los reactores de agua ligera a presión o en ebullición. El tercero, en menor número, es el Candú de agua pesada que ofrece ciertos atractivos a países que comienzan ahora a crear su propia tecnología nuclear.

En 1997 hay funcionando en el mundo 444 reactores nucleares que generan comercialmente electricidad. Hay una diversidad de modelos y de edades y se pueden plantear muchas preguntas acerca de su seguridad y de las implicaciones que la edad trae a estas como a otras instalaciones.

En mi opinión es útil la comparación con la industria aeronáutica. Conviven en nuestros días muchos tipos de aviones de edades diversas. Todos ellos, aún los más antiguos -el caso del DC-3 es paradigmático- tienen una seguridad suficiente si se ha observado un plan de mantenimiento correcto. Algo semejante ocurre con el mundo del automóvil. Los modelos nuevos incorporan muchos más sistemas tendentes a mejorar la seguridad, pero no por eso se estima que los modelos anteriores no tienen una seguridad suficiente y deben ser eliminados de la circulación.

Las centrales nucleares requieren un largo proceso administrativo para obtener las autorizaciones necesarias, un periodo de 5 a 6 años para su construcción y una inversión muy alta, que sólo se puede compensar con una vida suficientemente larga donde predominen sus bajos costes de combustible y mantenimiento. Esto explica que en países en que hay un alto grado de crecimiento y se contempla el futuro a largo plazo, aún hoy, con precios bajos de los combustibles, se sigan construyendo centrales nucleares. Así se encuentra la situación actual, que se presenta macroscópicamente en la tabla 35, donde aparece la capacidad nuclear de generación eléctrica en MW eléctricos netos en el mundo desde 1990 a 1997 y la proyectada hasta el año 2010. Se aprecia hasta el 2005 un mantenimiento de la capacidad en los países de la Europa occidental y Norteamérica y un crecimiento notable en los países asiáticos de alto nivel de crecimiento como Japón, China, Taiwán, India y Corea del Sur. Ambas tendencias son más acusadas en el horizonte del año 2010, tendiendo a la disminución los países occidentales, y a un

Figura 45

	Reference Plant	Recommended Plant
Thermal Power	1,400 MW(t)	1800 MW(t)
Electric Output	538 MW(e)	692 MW(e)
Net Efficiency	38.4%	38.4%
Number of Fuel Columns	66	84
Number of Fuel Elements	660	840
Refueling Interval (at 80% capacity factor)	20 months	18 months
Core Power Density	5.9 W/cm3	6.0 W/cm3
Fuel Cycle	LEU/Th	LEU/Nat.U
Fuel Enrichment (U-235)	19.9%	19.9%

Table 1. HTGR plant parameters.

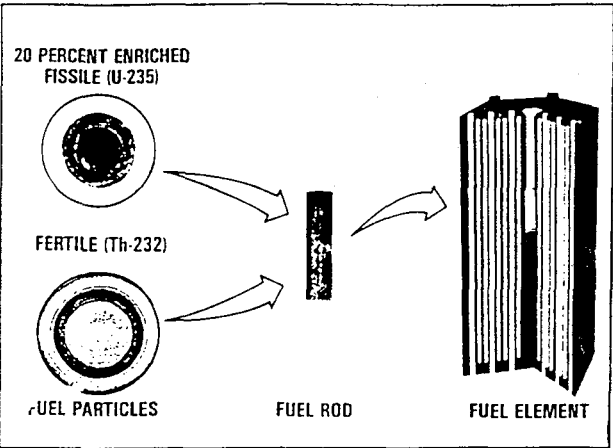


Figure 5. Makeup of fuel elements.

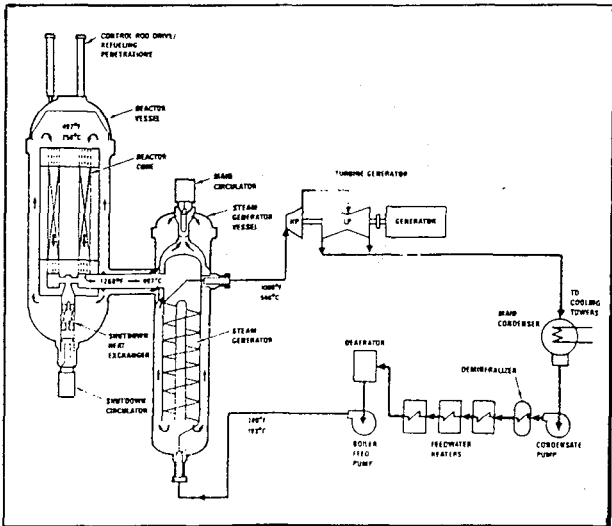
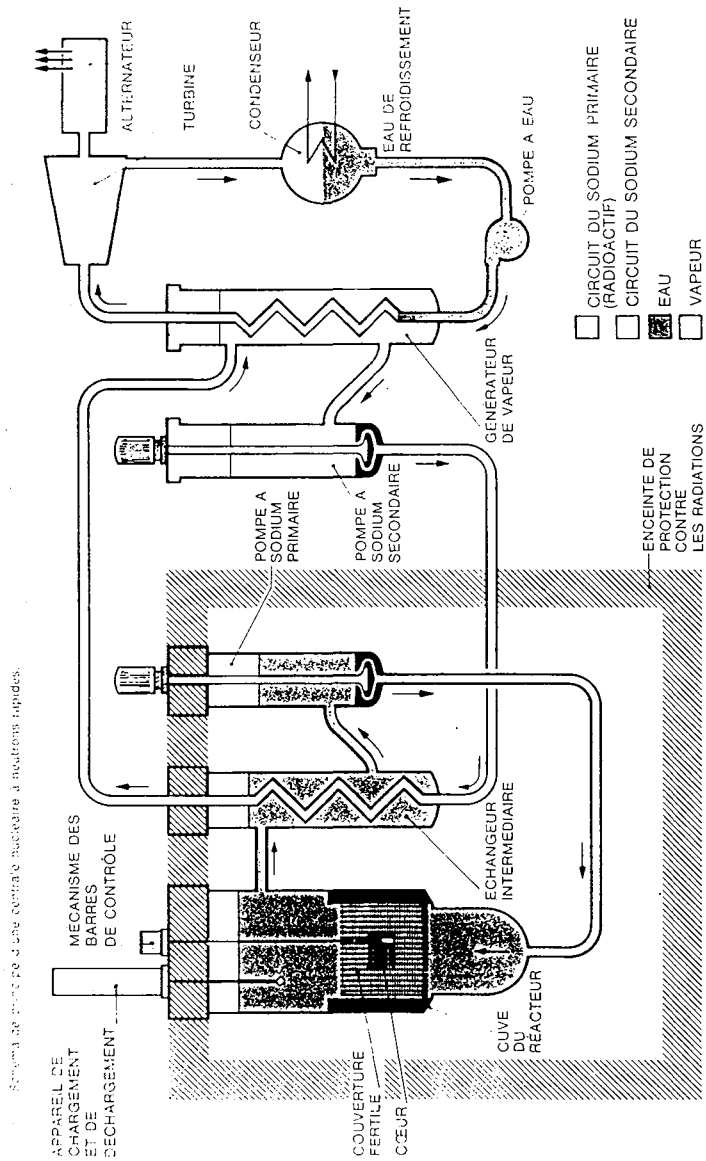


Figure 6. Simplified flow diagram of HTGR

Figura 46



aumento todavía mayor en los países de Asia, a cuyo número se incorporan Corea del Norte, Tailandia, Indonesia e Irán.

WORLD NUCLEAR GENERATING CAPACITY (MWE NET)

1990 - 2010

Country	Past 1990	Past 1995	Current 1997	Projected 2000	Projected 2005	Projected 2010
Argentina	935	935	935	1,627	1,292	1,282
Armenia	0	0	370	740	740	740
Belgium	5,617	5,617	5,617	5,617	5,617	5,617
Brazil	626	626	626	1,871	1,871	3,118
Bulgaria	2,585	3,538	3,538	3,130	2,859	3,812
Canada	13,067	14,862	14,862	14,862	14,862	12,802
China	0	2,080	2,080	2,080	7,608	11,051
Cuba	0	0	0	0	417	834
Czech Republic	1,670	1,670	1,670	2,582	3,494	3,494
Finland	2,290	2,310	2,354	2,848	2,848	2,848
France	53,323	58,573	62,928	64,393	64,160	65,815
Germany	23,310	21,038	21,058	21,058	20,718	20,718
Hungary	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
India	1,089	1,695	1,695	2,355	3,015	7,075
Indonesia	0	0	0	0	900	1,800
Iran	0	0	0	0	1,293	2,586
Japan	30,329	39,845	43,482	43,462	49,667	66,104
Kazakhstan	135	135	135	135	170	670
Lithuania	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500
Mexico	654	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
The Netherlands	507	507	452	452	0	0
North Korea	0	0	0	0	930	1,900
Pakistan	125	125	125	405	408	685
Romania	0	0	620	620	1,240	1,860
Russian Federation	19,093	19,843	20,758	22,668	22,844	21,772
Slovak Republic	1,632	1,632	1,632	2,040	2,888	2,448
Slovenia	632	632	632	632	632	632
South Africa	1,844	1,844	1,844	1,844	1,844	1,844
South Korea	7,220	8,220	9,013	13,320	18,149	25,393
Spain	7,099	7,099	7,199	7,199	7,199	7,048
Sweden	10,005	10,005	10,005	9,405	8,505	8,505
Switzerland	3,055	3,055	3,055	3,055	3,055	3,055
Taiwan	4,918	4,918	4,918	4,918	8,218	7,518
Thailand	0	0	0	0	0	900
Turkey	0	0	0	0	0	2,000
Ukraine	13,050	13,078	13,078	13,134	16,040	15,040
United Kingdom	12,320	12,868	12,868	12,888	10,468	9,513
USA	99,739	99,148	100,326	100,259	99,749	92,733
Vietnam	0	0	0	0	1,000	1,000
TOTAL	321,069	341,406	354,043	364,362	385,829	412,531

En los países de Europa, occidental u oriental, el problema de la sustitución de los actuales reactores se presentará a partir del año 2010 cuando comience el plazo de 40 años previsto para la vida de los reactores actuales. Un camino previsible es la prolongación de su vida hasta 60 o más años. Con un mantenimiento adecuado y una sustitución de los equipos que lo exijan no es un plazo que pueda ser considerado irreal. Sustituciones que inicialmente se consideraban como ilusorias o antieconómicas, como las de los generadores de vapor, son ahora corrientes. Igualmente se han realizado tratamientos térmicos para recuperar las propiedades mecánicas de las vasijas de presión. En la antigua Unión Soviética se hizo con algunos de sus reactores y en Estados Unidos con los de algunos submarinos nucleares. Se podría pensar en hacer algo semejante con las vasijas de los reactores actuales cuando el programa de seguimiento que se hace de todas ellas mediante muestras en su interior así lo aconseje. Y en todo caso queda la posibilidad de sustitución de la propia vasija, aunque ello sea más costoso que hacerlo con la de los tubos de presión de los reactores Candu o RBMK que se hace de forma habitual.

Otro camino es la sustitución del propio reactor por los llamados reactores avanzados.

Basados en la experiencia de los modelos actuales, los objetivos que desean obtener sus diseñadores mediante una mayor y mejor utilización de las propiedades físicas inherentes al sistema combustible-moderador-refrigerante son reducir la complicación de los sistemas ingenieriles actualmente empleados, reducir el número de componentes, reducir el tiempo de construcción y reducir las inversiones necesarias.

Dentro de estos objetivos generales hay también varias tendencias. Una es disponer de diseños de menor capacidad más adaptables a países en desarrollo en que la demanda y la red eléctrica no aconsejan el empleo de grandes unidades. Otra es conseguir la estandarización del reactor, lo que simplifica el proceso de autorización a semejanza de lo que ocurre en la industria aeronáutica evitándose el análisis pormenorizado de cada reactor a instalar. Un paso en este sentido se ha dado ya en Estados Unidos por las empresas proyectistas proponiendo la aprobación genérica de sus prototipos antes de su posible construcción.

Las propuestas de reactores avanzados van en dos direcciones. Una es la llamada evolucionista, basada en la experiencia con los reactores actuales, modificando lo que sea necesario. Es la tendencia de los constructores americanos, europeos y rusos. La otra consiste en nuevos diseños, que son a veces llamados revolucionarios y exigirán la construcción de prototipos.

Una lista de los proyectos en curso de estos nuevos tipos de reactores se da en la tabla 37. Se ha dividido en tres grupos, de acuerdo con sus posibilidades de construcción. En el grupo I aparecen algunos ya construidos o en construcción en Japón, como el ABWR de General Electric, en colaboración con Hitachi y Toshiba, y el APWR, de Westinghouse en colaboración con Mitsubishi. El grupo II, también evolucionista como el primero, está más retrasado en el tiempo. De los contenidos en este grupo sólo el AP600 de Westinghouse presenta posibilidades. En el tercer grupo están incluidos tres de nuevo diseño que no han pasado de la fase conceptual y cuyas posibilidades son todavía menores. Se puede incluir en este grupo el concepto de amplificador de energía del premio Nobel C. Rubbia, que, retomando una antigua idea, asocia un acelerador para provocar una abundancia de neutrones mediante espalación con un reactor inicialmente subcrítico, basado en el ciclo del Torio, funcionando como reactor rápido con Plomo como refrigerante.

Tabla 37

Nuevos reactores de fisión

I.	ABWR	1000-1500 MW	EN CONSTR. (JAPON)	GE HITACHI TOSHIBA
	APWR	"	"	W MITSUBISHI
	EPR	"	EN PROYEC. (FRANCIA- ALEMANIA)	FRAMATOME SIEMENS
	S80	"	EN PROYEC. (US-SUIZA- SUECIA)	ABB COMBUSTION ENG.
	VVER	1000	EN PROYEC. (RUSIA)	MINATOM
II.	SBWR	600	EN PROYEC. (US)	GE
	AP600	600	"	W
	VVER	500-600	EN PROYEC. (RUSIA)	MINATOM
III	PIUS	600	DISEÑO CONCEPTUAL (SUECIA)	ABB
	SIR	300	DISEÑO CONCEPTUAL (US-UK)	COMB. ENG.- ROLLS-ROYCE
	HTR	200	DISEÑO CONCEPTUAL (US)	GEN. ATOMICS

Tabla 38

Comparación cuantitativa global entre el AP-600 y el reactor tipo de agua a presión de doble circuito	
Componentes	Reducción (%)
Válvulas	60
Bombas de gran tamaño	50
Tuberías	60
Intercambiadores de calor	50
Conductos ventilación, calefacción y refrigeración	35
Volumen de la estructura sísmica	60
Cable de control	80

El más destacado de todos es el ABWR, que tiene ya en funcionamiento dos unidades, los reactores 6 y 7 de la central de Kashiwazaki-Kariwa, ambos de una potencia de 1.300 MW.

En Estados Unidos los tres proyectos sometidos al organismo regulador NRC, el S80+ de ABB-Combustion, y el APWR y AP600 de Westinghouse han recibido la primera aceptación de documentación que significa haber pasado la primera valla del proceso de consecución de la licencia.

Un ejemplo de la significación de los nuevos conceptos evolucionistas se presenta en la tabla 38, donde se indican las reducciones que se pueden obtener en el tipo AP600 en cuanto a número de válvulas, bombas y cambiadores de calor, de tuberías, conductos y cableado de control y volumen de estructuras antisísmicas.

Los Residuos radiactivos

Al comienzo del desarrollo de la energía nuclear se pensaba que el reproceso de los combustibles nucleares gastados, que son, aparte de las explosiones, la mayor y más importante fuente de residuos radiactivos, daría lugar a un reciclado del Uranio no quemado y del Plutonio producido y que los productos de la fisión del Uranio se almacenarían como otros residuos tóxicos en depósitos de seguridad ó en minas antiguas agotadas.

El uso creciente de los isótopos radiactivos comenzó también a plantear el problema de su almacenamiento y en la década de los 70 comenzó la preocupación del público y convirtió este problema en un problema de primera magnitud acentuado por los grupos antinucleares que encontraron en él una fuente inagotable de argumentos para justificar sus opiniones sobre la conservación de la Naturaleza, los peligros de la proliferación nuclear y la organización de la sociedad actual.

La primera cuestión que se plantea es la propia definición de residuo radiactivo, que generalmente corresponde a todo material que contiene sustancias radiactivas en concentraciones superiores a lo establecido por las autoridades competentes para el cual no se prevé utilización y no es eliminable por dilución o dispersión. La definición plantea a su vez dos puntos importantes: la concentración mínima para que un material radiactivo sea considerado como residuo y la temporalidad de su empleo al no tenerse en cuenta los posibles avances de la tecnología.

Es creencia extendida que todo lo radiactivo es artificial y nuevo. La verdad, sin embargo, es otra. Los materiales radiactivos naturales existen en la Tierra desde que se formó ésta a partir de la explosión de una supernova, lo que equivale a decir que, teniendo en cuenta la desintegración de los elementos radiactivos, el ambiente era entonces mucho más radiactivo que ahora. Y esto ocurre, no solo con las series naturales del Uranio y el Torio, sino con otros isótopos como el Potasio-40, el Rubidio-87, el Samario-152, el Lutecio-176 ó el Renio-187, cuyos largos periodos de desintegración – desde los 430 millones de años del primero hasta los 4 billones del último citado- han permitido que lleguen cantidades medibles hasta nuestros días.

Todos ellos están presentes en los diversos componentes de la litosfera y entran en la composición de muchos de los materiales usados y consumidos por el hombre. Mención especial debe hacerse del Radón, radisótopo gaseoso que origina la mayor proporción de la dosis de radiactividad que todos recibimos por causas naturales, y del Potasio-40, que es el componente radiactivo más importante del mundo en cuanto a cantidad y está presente en el agua de los mares y Océanos y en todos los seres vivos, que obviamente somos todos radiactivos.

Pero además, continuamente llegan a la Tierra radiaciones del espacio exterior, la denominada radiación cósmica, que interacciona con los elementos presentes en nuestra atmósfera y genera continuamente elementos radiactivos. De estos isótopos cosmogénicos merecen destacarse dos, el Hidrógeno-3 ó Tritio, que entra también posteriormente a formar agua, y el Carbono-14, que se incorpora al ciclo del Carbono formando parte de la estructura de los seres vivos y que ha dado lugar al conocido método de datación.

Estos dos tipos de materiales radiactivos se unen a los producidos por las actividades humanas, presentados en la tabla 39 donde se les ha dividido arbitrariamente por su origen militar ó procedentes de actividades pacíficas.

Un breve comentario sobre los residuos de origen militar. Las explosiones en la atmósfera han dejado en las zonas altas grandes cantidades de radiactividad que caen y seguirán cayendo durante algún tiempo constituyendo lo que suele llamarse poso radiactivo o en inglés fallout. Uno de los elementos formados durante las explosiones y que forma parte del poso es el Plutonio. Afortunadamente los valores que ello representa no afectan de modo apreciable la vida de los seres vivos. El otro gran residuo consiste en los submarinos nucleares que se hundieron con sus reactores de propulsión y con sus armas nucleares. Dos de ellos, norteamericanos, están en el Atlántico. Otros siete, soviéticos, están el Pacífico, en el Atlántico y en el Artico. Sin contar, con los hundidos por los rusos en los mares próximos a sus costas del Norte una vez desmontados y retirados los combustibles y las armas.

Tabla 39

Origen de los residuos radiactivos artificiales

1. Militares.

- Explosiones en la atmósfera
- Residuos de la fabricación de explosivos nucleares
- Submarinos nucleares
- Satélites y vehículos espaciales con fuentes radiactivas

2. Pacíficas.

- Generación de electricidad
- Residuos de la fabricación de combustibles nucleares
- Clausura de instalaciones radiactivas y nucleares
- Utilización de isótopos radiactivos.

España es un país de la zona intermedia en la generación de residuos de todo tipo. Los valores de residuos urbanos, industriales, tóxicos y peligrosos, radiactivos y gaseosos están alrededor de la media de la Unión Europea.

Comparemos, para entender la notoriedad adquirida por los residuos radiactivos primeramente las cantidades generadas anualmente de los residuos de todo tipo en nuestro país. En la tabla 40 aparecen todos, como promedio de los últimos años.

Los valores más altos corresponden a las emisiones de CO₂ , 176 millones de toneladas al año, y después a los agropecuarios con 127 millones de toneladas. Los residuos urbanos, englobando domésticos, lodos y tratamiento de aguas y escombros y excavaciones a unos 47 millones de toneladas, los mineros a 70 millones y los forestales a 17 millones son de residuos tóxicos y peligrosos.

En comparación los residuos radiactivos ascienden solamente a 18.300 toneladas al año de las que 1.300 son de residuos de alta actividad.

Cifras comparables surgen de las estimaciones de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, ENRESA, para el período de 40 años de vida de las centrales nucleares españolas

Tabla 40

Producción de residuos en España
M. ton/año

Urbanos.

Domésticos	15
Lodos y tratamiento aguas	10
Escombros y excavaciones	22

Industriales.

Agropecuarios.....	127
Mineros	70
Forestales.....	17
Industriales	15
Inertes.....	11
Peligrosos	4
Radiactivos	0,0183
Baja y media act....	0,017
Alta actividad.....	0,0013

Gaseosos.

CO ₂	276
CO	4
SO ₂	3
NO _x	1
Orgánicos volátiles	2
Partículas	1
Plomo	0,003
CFC	0,010

Durante dicho tiempo los residuos de alta radiactividad ocuparán un volumen de 12.000 metros cúbicos, es decir, el equivalente a un campo de fútbol cubierto con una capa de 1,3 metros y los residuos de media y baja actividad unos 200.000 metros cúbicos, es decir, unas 16 veces los anteriores.

Este volumen comprende los residuos generados por el funcionamiento de las centrales (65% los de baja y media y 5% los de alta), los producidos en el desmantelamiento y clausura de las centrales (un 24% y un 6% para el resto de residuos radiactivos).

En comparación, durante los mismo 40 años, se habrán producido 580 millones de metros cúbicos de residuos tóxicos y peligrosos, tal como se indica en la figura 47.

VOLUMEN DE RESIDUOS A GESTIONAR DURANTE 40 AÑOS EN ESPAÑA

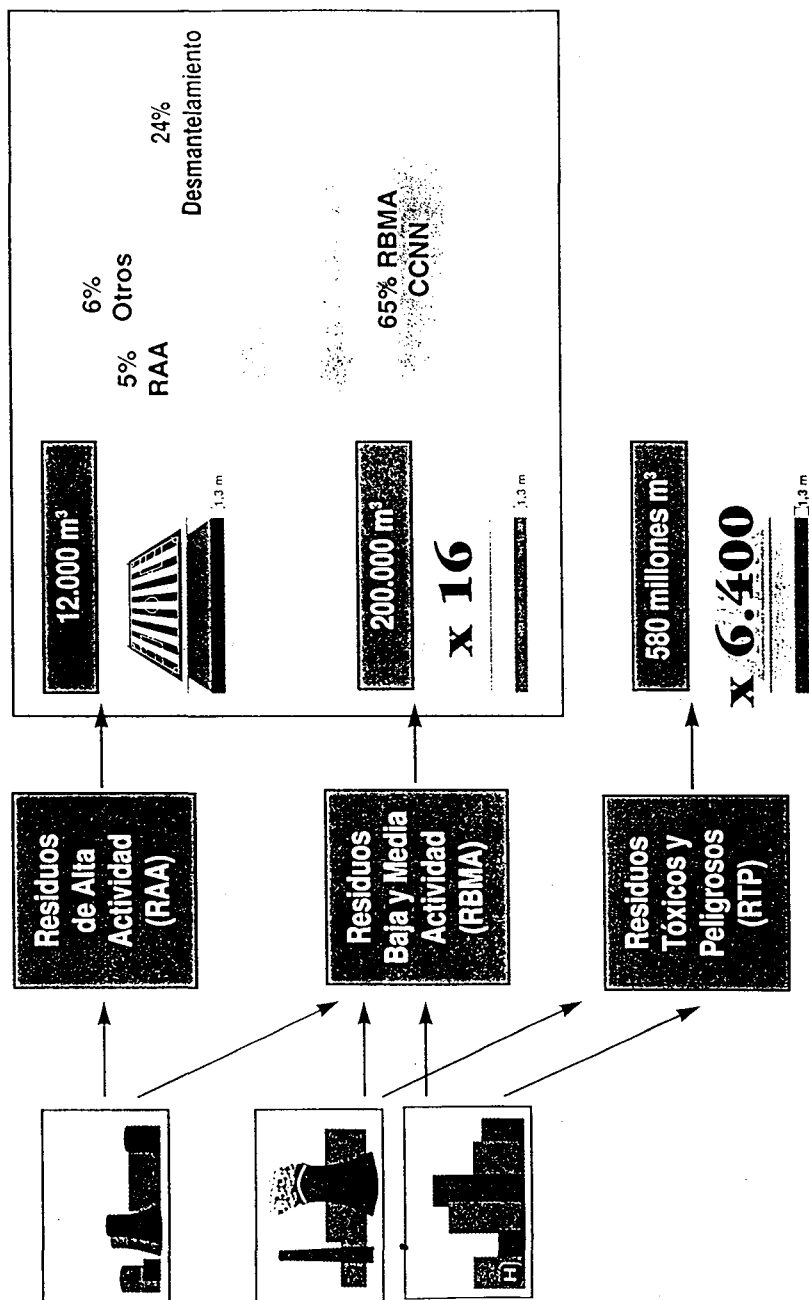


Figura 47

Figura 48

CONSUMOS, RESIDUOS Y OCUPACION DE DISTINTOS TIPO DE CENTRALES ELECTRICAS				
Potencia tipo: 1.000 Mwe.	Factor de carga 75 por 100 (6.600 horas/año)	Producción: 6.600 millones Kwh/año		
	Central de carbón	Central de fuel	Central de gas natural	Central nuclear (PWR)
Consumo diario medio	6.300 Tn.	4.400 Tn.	4.4 Mm³	75 Kg.
Consumo diario máximo (plena carga)	8.400 Tn.	5.800 Tn.	5,8 Mm³	100 Kg.
Consumo anual	2.52 Mtn.	1.52 Mtn.	1.700 Mm³	27,2 Tn.
Oxígeno consumido cada año	6,5 Mtn.	4,8 Mtn.	4,6 Mtn	—
CO₂ enviado a la atmósfera cada año	7,8 Mtn.	4,7 Mtn.	3,2 Mtn	—
Combustible transportado cada año	66 minerales de 35.000 Tn. y/o 23.000 vagones de 100 Tn.	Oleoducto y/o 3 petroleros gigantes de 500.000 Tn.	Gaseoducto y/o 20 metaneros de 125.000 m³	Algunos camiones
Superficie de suelo ocupada (en Ha. para 4x1.000 Mw)	300	250	200	200
SO₂ enviado a la atmósfera cada año	39.800 Tn.	91.000 Tn.	2.540 Tn.	—
NO₂ enviado a la atmósfera cada año	9.450 Tn.	6.400 Tn.	21.000 Tn.	—
Cenizas enviadas a la atmósfera cada año: Con filtros	6.000 Tn.	1.650 Tn.	—	—
Residuos sólidos generados cada año: Sin filtros	383.000 Tn.	4.700 Tn.	340 Tn.	—
	69.000 Tn. de cenizas de horno.	Cenizas de horno: menos de 8 m³	—	Alta actividad: 3,75 m³ vitrificado
	377.000 Tn. cenizas volantes		—	Media y baja actividad: 500 m³
Actividad generada junto a la central (curios/año)	0,02 a 6	0,01	—	10.000 a 12.000 (

(*) Se considera almacenamiento de gases antes de s
Fuente: Le Concours Medical.

No parece, por tanto, que la cantidad sea un factor importante en la importancia atribuida a estos residuos.

Otra comparación que conviene destacar es la que evidencia las distintas cantidades de combustible y de residuos que requieren y generan distintos tipos de centrales alimentadas con carbón, fuelóleo, gas natural y Uranio. Tal como se indica en la figura 48 para las mismas condiciones de capacidad y de horas de funcionamiento anuales el consumo anual de combustible es de varios millones de toneladas ó millardos de metros cúbicos en el caso de los combustibles fósiles y de 27,2 toneladas en el caso de la central nuclear.

Los residuos enviados a la atmósfera son también varios millones de toneladas de CO₂ y ninguna, respectivamente y lo mismo ocurre con los miles de toneladas de SO₂ y NO₂ de los combustibles fósiles y cero para la central nuclear.

Los residuos sólidos dependen evidentemente de las impurezas que acompañan al Carbono en un caso y de todos los residuos radiactivos formados, en el otro. Desde este punto de vista, el gas natural solo produce unos cientos de toneladas, el fuelóleo varios miles y el carbón cientos de miles de toneladas.

Evidenciando el bajo volumen de residuos radiactivos, las cifras de esta tabla, de origen francés, dan 3,75 metros cúbicos de residuos de alta actividad (lo que supone reproceso del combustible gastado) y 500 metros cúbicos de residuos de media y baja.

Es curioso señalar que el carbón y el fuelóleo, como productos naturales que son, emiten una cierta, si bien baja, radiactividad.

Una característica importante de los residuos radiactivos es que están controlados totalmente. Se conocen su origen, su historia y su composición y está prevista la aportación necesaria para hacer frente a los costes de su gestión y almacenamiento, incluidos los del desmantelamiento y clausura de las instalaciones. Muy probablemente son los únicos residuos de los que se puede hacer esta afirmación.

Su peligrosidad estriba en la emisión de radiaciones no apreciables por los sentidos que a dosis altas tienen efectos graves para los organismos vivos. Esta falta de apreciación y la gran sensibilidad de los instrumentos confunden y crean angustia y temor en el público. No son ajenos a esto los expertos en protección radiológica que, estimando que a efectos de protección toda radiación puede ser peligrosa, han dado argumentos suficientes para pensar que todo lo que puede ocurrir ocurrirá. De ahí que se haya olvidado que la humanidad surgió y ha evolucionado en un ambiente radiactivo, más radiactivo al principio que ahora, y que las dosis naturales, bajas eso sí, nos acompañan a lo largo de nuestras vidas.

Otra característica que se ha discutido mucho es la duración de los tiempos de almacenamiento para que la radiactividad de los residuos decaiga hasta niveles como los que se encuentran en la Naturaleza. Dejando para más adelante una discusión sobre ello, los residuos de alta actividad, los combustibles gastados, sin reproceso, que son los que requieren un almacenamiento más prolongado, esto es, con un almacenamiento directo, deben ser mantenidos así 100.000 años. Con reproceso, este tiempo se reduce a 10.000 años si se separa, además del Uranio no quemado y de los productos de la fisión, el Plutonio generado y a unos 1.000 ó 2.000 años si además se separan el Americio y el Neptunio. Cabe aquí señalar que una gran parte de los residuos tóxicos y peligrosos hay que almacenarla permanentemente, para que no entren de nuevo en la biosfera ya que su peligrosidad es innata y será eterna. Por el contrario, los residuos radiactivos se autodegradan espontáneamente, aunque algunos necesiten para ello mucho tiempo.

Se ha repetido numerosas veces que esta combinación de características imposibilita la solución de los problemas que plantean los residuos radiactivos. Sobre todo, a tiempos largos.

Sin embargo, los que plantean los de baja actividad, tanto por su origen en muchos caso –aplicaciones médicas, investigación e incluso los procedentes de centrales nucleares- como por su duración –de 50 a 100 años ó en el límite 250-, se admite que son solucionables. De hecho, en países como Suecia y Francia, ya existen almacenamientos definitivos y en otros –Finlandia, Alemania- el proceso de construcción y autorización está próximo.

Para el combustible gastado la gestión se establece según una vía, el ciclo abierto, que lo considera ya como residuos de alta actividad o según otra vía, el ciclo cerrado, mediante reproceso, reparación de los productos de la fisión y recirculación del Uranio y del Plutonio. En ambos casos, tal como se señala en la figura 49, el combustible gastado ó la disolución de productos de fisión deben ser almacenados durante algunos decenios para que los isótopos de vida corta se desintegren, y el calor generado sea más bajo. Tras ello la etapa final es el almacenamiento definitivo, que, como ya se mencionó, debe durar milenios.

El tratamiento de los residuos de baja actividad es muy sencillo. Estos residuos consisten en materiales de limpieza, papeles, ropas y guantes contaminados y en residuos de purificación y mantenimiento como filtros, resinas y lodos de evaporador. Se suelen utilizar técnicas de compactación e incineración, tras los que se incorporan a una matriz estable, que corrientemente es cemento. Según el contenido radiactivo que se refleja en la dosis en superficie, se introduce la mezcla en bidones normalizados según los requerimientos del centro receptor.

Los radionucleidos más importantes en los residuos de alta actividad pertenecen a dos grupos esencialmente distintos: los emisores beta-gamma, responsables principales de las emisiones y, por tanto, de la generación de calor durante los primeros siglos y los emisores alfa, de vida mucho más prolongada, responsables de su peligrosidad a largo plazo por su posible ingestión o inhalación si se incorporan a la biosfera.

Químicamente, los primeros pertenecen a familias muy diferentes. Los principales son el estroncio-90 (período 30 años) y Cesio-137 (30 años), entre los productos de fisión y el Cobalto-60 (5 años) y el Hierro-55 (2,5 años) entre los productos de actividad neutrónica.

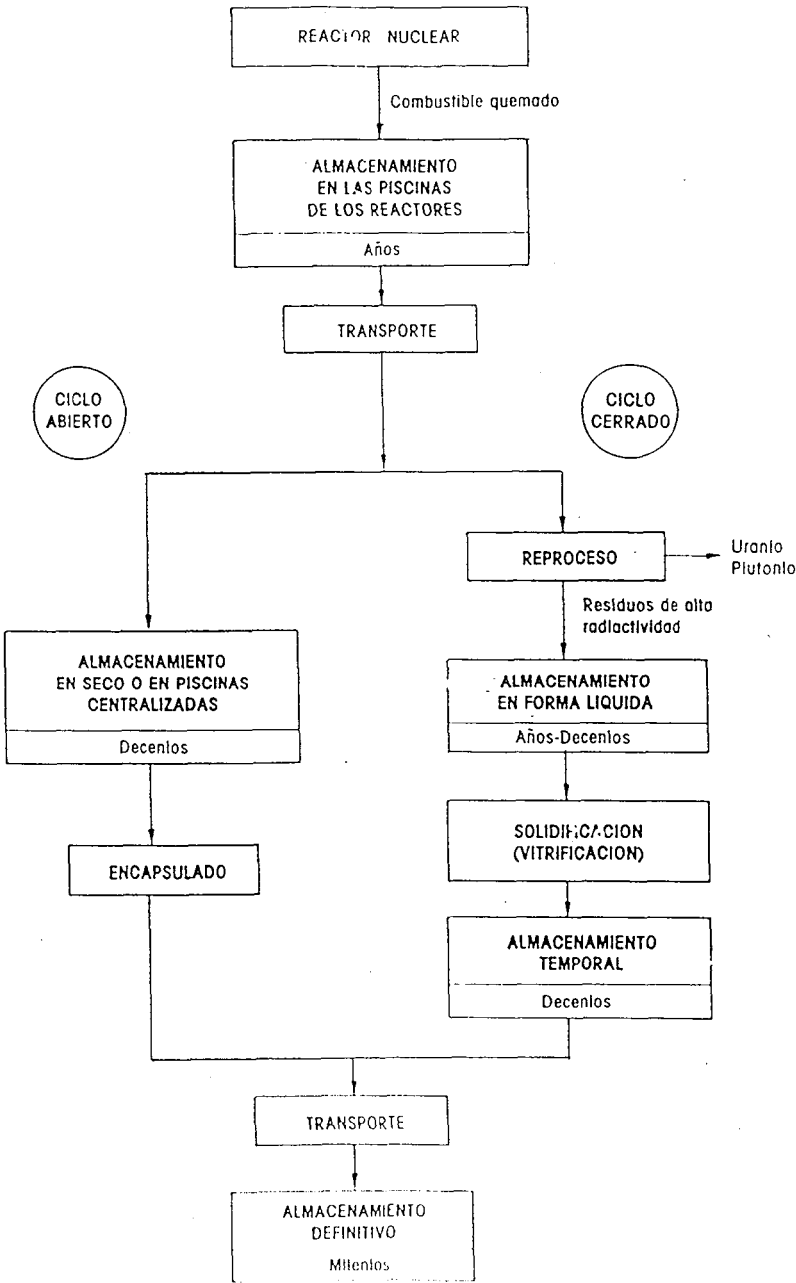
Los segundos son todos transuránidos y de ellos deben destacarse por sus largos períodos el Americio-241 (400 años), Americio-243 (8.000 años), Plutonio-239 (24.000 años) y Neptunio-237 (2 millones de años).

En la compactación de los combustibles gastados se sigue manteniendo la integridad de las barras que forman el conjunto para conservar los radionucleidos confinados.

En cambio, en el reproceso es preciso solidificarlos y después incorporarlos a una matriz estable, que normalmente es un borosilicato que reúne junto a una gran resistencia a la corrosión en medios acuosos, una estabilidad comprobada al calor y a la radiación. Vidrios más susceptibles a la corrosión y de menor estabilidad estructural han sido hallados en Oriente Medio, Egipto y Roma con una antigüedad de varios milenios. Otra alternativa aún en desarrollo es el proceso australiano Synroc, que trata de obtener una roca sintética .

Figura 49

GESTION DE RESIDUOS RADIOACTIVOS



Estrategias para la parte final del ciclo del combustible nuclear

Para mantener aislados los radionucleidos y evitar su dispersión, la solución elegida es la interposición múltiple de barreras que corresponden a tres categorías: fisicoquímica, ingenieril y geológica. A la primera pertenece la solidificación y la vitrificación antes citadas en el ciclo cerrado y la fabricación de las barras combustibles en el ciclo abierto. La segunda consiste en un contenedor donde se introduce el vidrio o el combustible compactado, que se recubre a su vez con varias capas de materiales generalmente metálicos para favorecer la salida de calor, la selección de los cuales depende de la formación geológica donde se instalará el almacenamiento final. Su misión principal es impedir el acceso de agua. La barrera geológica tiene objetivos pasivos como son retardar la posible difusión de los radionucleidos a la biosfera y atenuar los posibles impactos exteriores –naturales o hechos por el hombre– que puedan alterar la integridad de los contenedores. Entre el contenedor y la formación geológica se suele disponer un material absorbente como bentonita para retener el agua que pueda entrar o los radionucleidos que puedan salir.

Se ha supuesto en las consideraciones anteriores que el almacenamiento definitivo que parece más probable es en formaciones geológicas estables en profundidad. No es ésta la única solución estudiada. Una amplia gama se da en la tabla 41. En la actualidad la utilización de los Océanos y mares y de la Antártida para este fin está prohibida por acuerdos internacionales y el envío al Sol o al espacio exterior no tiene aún suficiente fiabilidad. Solamente quedan como soluciones la transmutación y el almacenamiento en superficie o en una formación geológica.

– Tabla 41

Almacenamiento o evacuación de residuos radiactivos

1. Transmutación
2. Envío al espacio exterior
3. Introducción en el hielo de la Antártida
4. Colocación sobre fondos marinos
5. Introducción en el subsuelo marino
6. Almacenamiento en instalaciones de superficie
7. Almacenamiento en formaciones geológicas profundas

La transmutación requiere un exceso de neutrones y esto sólo se puede lograr en reactores rápidos o mediante espalación promovida por un acelerador, tal como ha sido propuesto recientemente por científicos americanos y posteriormente por Rubbia.

Respecto al almacenamiento hay preferencia hacia una u otra solución según se de más ó menos importancia a su supervisión y a la recuperabilidad con vistas a una futura utilización o al énfasis en la seguridad y en la estabilidad. La mayor parte de los expertos se inclinan hacia la solución en profundidad.

Queda finalmente por discutir cómo una solución basada en los conocimientos y tecnología actual puede resistir el paso de tiempos que exceden de la experiencia histórica de la humanidad. El mantenimiento de la integridad de los contenedores, la previsión de su comportamiento, evitar intrusiones de personas o animales, tener en cuenta la posibilidad de cambios en la sociedad, de guerras, conflictos o sabotajes, no

impedir futuras explotaciones de recursos, poder resistir seismos o maremotos y todo tipo de catástrofes naturales son algunas de las reflexiones que pueden hacerse.

Será difícil contestar a todas estas cuestiones con garantía absoluta de encontrar argumentos totalmente justificativos, pero una somera revisión de la Geología, la Historia y la Sociología puede ofrecernos antecedentes que permitan considerar razonable la solución propuesta para el almacenamiento de los residuos radiactivos durante milenios.

En la tabla 42 se han resumido algunos hechos históricos que pueden ser pertinentes. Comentémoslos brevemente.

Tabla 42

Algunos hechos históricos

- Fenómenos naturales

Oklo, Gabón	reactor nuclear natural	2.000 millones de años
Cigar Lake	yacimiento de Uranio	5.000 millones de años
Siberia	mamuts en glaciares	varios millones de años
Varios	ambar (resina fósil)	varios millones de años

- Materiales

Vidrios	Oriente Medio y Egipto	4.000-4.500 años
Cerámica	Varios países	~ 2.000 años
Bronce	Mar, Tierra	500-1.000 años

- Estructuras

Pirámides	Egipto	~ 3.000 años
	Mesoamérica y Méjico	700-1.500 años
Edificios	Italia, Francia, España (Coliseo, Foros, Acueductos ...)	1.500-2.000 años
Caminos	Calzadas romanas	1.500-2.000 años
Iglesias y Catedrales		600-800 años

- Instituciones

Universidades		700 años
Estados		500 años
Holanda	Diques	Siglos

De todos es conocido el hallazgo de mamuts conservados intactos desde hace miles de años o la existencia en el ámbar, que no es otra cosa que una resina fósil, de insectos atrapados en ella durante un tiempo comparable al anterior.

En cuanto a materiales de construcción hechos por el hombre, vidrios de Egipto y al Oriente Medio o espadas de bronce y hierro, persas, egipcias y de los hititas, tienen antigüedades del orden de los 4.000 años o más, cerámicas de muy diversos países con más de 2.000 años son corrientes en las costas del Mediterráneo y broncees sumergidos en el mar o enterrados se han encontrado con edades entre 500 y 1000 años.

Estructuras como las pirámides de Egipto pueden alcanzar los 3.000 años y las de Mesoamérica y Méjico de 700 a 1.500, Edificios con más de 1.500 años se encuentran en Italia y en todos los demás países colonizados por Roma. Las calzadas romanas han llegado a nuestros días.

Todo ello sin protección alguna y sin ánimo de duración.

Estructuras administrativas como los Estados o las Universidades tiene ya más de 500 años y un ejemplo de administración, supervisión, técnica y conservación continuadas son los diques de Holanda, gracias a los cuales se mantiene una buena parte de ese país aunque esté a nivel inferior al del mar.

Pero quizá convenga discutir más en detalle dos fenómenos naturales interesantes: los yacimientos de Uranio de Oklo, en el Gabón, Africa, y Cigar Lake en Canadá, América del Norte.

En Oklo se encontraron inicialmente anomalías en el contenido de Uranio-235 con valores inferiores a los que se presenta el Uranio natural en el resto del mundo. Investigaciones más profunda permitieron confirmar la teoría del profesor japonés P.K. Kuroda que hace unos 2.000 millones de años hubiera podido funcionar en la Tierra un reactor nuclear natural, dado que entonces el contenido de Uranio-235 en el Uranio natural tenía valores del orden de los que se emplean ahora en los reactores comerciales.

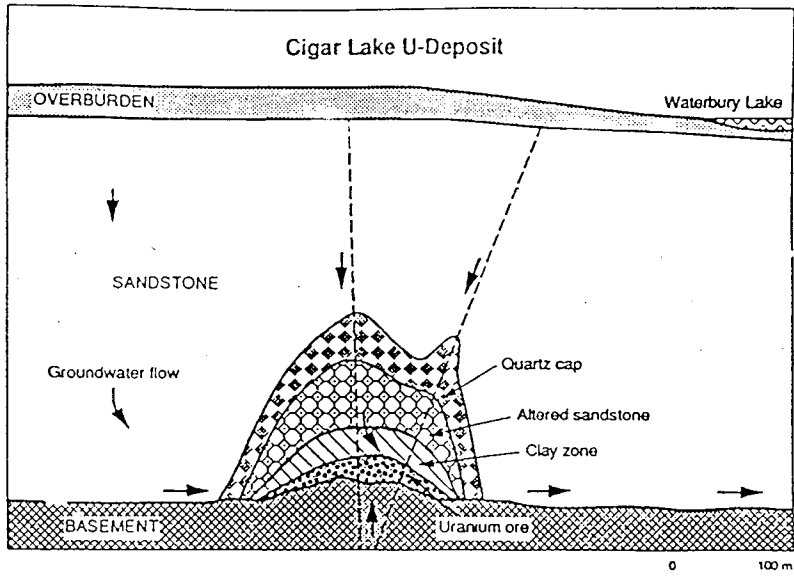
Efectivamente, en Oklo durante 400.000 ó 500.000 hace unos 2 millones de años funcionó un conjunto de reactores nucleares gracias a las avenidas de agua que llegaron al yacimiento de Uranio. El tiempo transcurrido hace que no se puedan encontrar ya los productos de la fisión del Uranio de vida mucho más corta, pero sí quedan y se han encontrado los isótopos estables descendientes de aquello. Y lo más sorprendente es que muchos de ellos están en las proximidades del yacimiento. Es decir, el terreno, las arcillas, han impedido la migración de los radionucleidos y de sus hijos durante todo este tiempo, a pesar de los cambios de clima y la continua acción atmosférica del viento y del agua.

Todo ello sin ninguna intervención humana y sin precauciones previas.

El yacimiento de Cigar Lake en Canadá ha sido hallado a unos 600 metros de profundidad gracias a las modernas técnicas de exploración. Un corte a su través está dado en la figura 50.

Casi encima tiene un lago, el lago Waterbury. Está situado en una arenisca y tiene debajo de la montera una cubierta, de fuera a dentro, de cuarzo, arenisca alterada y arcilla. Desde hace un millar de millones de años, este yacimiento ha estado como hoy está. Es un yacimiento de alto contenido en Uranio, entre el 10 y el 15%, y su única protección contra el agua era la capa de arcilla que lo protege por su parte superior.

Figura 50



The uranium deposit at Cigar Lake in Canada has many features that are similar to a repository for spent fuel. The high grade uranium ore, mostly uraninite (UO_2), has persisted for approximately one billion years without indication at the surface that the ore deposit exists, despite groundwater flow through the deposit. Thus, the combination of natural barriers has been effective in isolating the uranium ore from the surface environment for more than one billion years.

Igual que el yacimiento, se hubiera podido conservar un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad. La combinación de un óxido estable de Uranio, el UO_2 , y las barreras geológicas interpuestas han permitido que este yacimiento llegue intacto hasta nuestros días desde su formación hace aproximadamente un millardo de años.

Los estudios que se realizan en muchos países sobre formaciones geológicas diversas han originado una gran abundancia de conocimientos sobre la difusión del agua y de los distintos radionucleidos en la roca, las características de transmisión de calor, el comportamiento frente a las radiaciones, las velocidades reales de corrosión y, en general, de todas las interacciones entre el contenedor de los residuos y la roca que los aloja.

Como puede comprobarse en la figura 51, que da los laboratorios subterráneos existentes dedicados a estos estudios, las formaciones geológicas más estudiadas corresponden a cuatro grandes tipos: rocas cristalinas (granito, principalmente), domos de sal, arcillas y tobas volcánicas (tuf).

En todas ellas las investigaciones y los datos obtenidos en ellas se emplean para desarrollar modelos que simulen el comportamiento de los residuos, contenedores y formación geológica a lo largo del tiempo. Estos modelos, tanto más aproximados a la realidad actual como es posible, permite planificar y predecir los resultados de los nuevos experimentos a partir de los datos y conocimientos previos y se van perfeccionando progresivamente. La transformación de los modelos en programas de ordenador y el empleo de los grandes y rápidos ordenadores dan resultados de las predicciones a tiempos suficientemente largos. Tal es el caso que aparece en la figura 52, donde se llega hasta un límite de 5 millones de años.

Según este modelo, los residuos en una matriz de hormigón, situados en un contenedor y los conjuntos en grandes celdas de hormigón, permanecen invariables los primeros 300 años. A los 5.000 años la penetración de las aguas subterráneas comienzan a degradar los contenedores y el hormigón, a los 50.000 los radionucleidos comienzan a incorporarse a la roca circundante y a los 50.000 hay ya trazas de materiales radiactivos en las zonas alrededor del depósito.

Durante la lenta difusión de los radionucleidos va desapareciendo su radiactividad por desintegración por lo que a los 2 millones de años solamente una muy pequeña parte de ellos y algunos de sus descendientes siguen su alejamiento del depósito de forma que a los 5 millones de años, la desintegración es prácticamente completa y no llegan sustancias radiactivas a la superficie de la formación geológica.

Bajo la égida de la Unión Europea, se complementan los programas experimentales anteriores y los resultados del comportamiento de los radionúcleidos con la predicción de las dosis de radiación que se tendrían en las superficies de las formaciones geológicas como consecuencia de los depósitos de residuos radiactivos de alta actividad situados en ellas. Los datos obtenidos en el estudio PAGIS se representan en la figura 53 para los tres tipos de formaciones investigadas: arcilla, granito y sal.

Puede observarse que, a partir de los 100.000 años de la clausura del almacenamiento, las dosis calculadas de radiación son esencialmente nulas, alcanzándose las dosis máximas en el interior de las formaciones hacia un millón de años o después. En cualquier caso, en todos los casos las dosis debidas a los depósitos quedan lejos de las debidas a la radiactividad natural incluso observando, por las incertidumbres inherentes a este tipo de cálculos, una franja notable de seguridad.

Figura 51

**Établissements de recherche souterrains
d'évacuation des déchets radioactifs**

Pays	Endroit	Installation	Géologie et profondeur	Dates
Allemagne	Konrad	Recherche dans une ex-mine de fer	Couches jurassiques recouvertes d'argile 800-1300 m	Recherches depuis 1976
	Asse	Recherche dans une ex-mine de sel	Dôme de sel < 1000 m	Dépôt en exploitation 1967-1978
	Gorleben	Recherche dans des formations salines	Dôme de sel recouvert de gypse < 900 m	Creusage de puits depuis 1986
	Morsleben	Recherche dans une ex-mine de sel	Dôme de sel < 525 m	Recherches liées à la sûreté dans les années 60
Belgique	Mol/Dessel	Laboratoire de recherche souterrain HADES	Argile 230 m	Depuis 1983
Canada	Lac du Bonnet (Manitoba)	Laboratoire de recherche souterraine	Granit 240-420 m	Excavation depuis 1984
États-Unis	Yucca Mountain (Nevada)	Installation d'études exploratoires	Tuf ± 300 m	Excavation depuis 1993
Japon	Horonobe	Installation souterraine de recherche en profondeur	Roche sédimentaire < 1000 m	À l'étude
Royaume-Uni	Sellafield	Installation de caractérisation des roches	Tuf 920 m	Demande de planification en 1994
Suède	Äspö	Laboratoires de roches dures	Granit < 460 m	Excavation depuis 1990
	Stripa	Projet de recherches souterraines de l'AEN dans une ex-mine de fer	Granit < 400 m	1980-1992
Suisse	Grimsel	Laboratoire souterrain	Roches cristallines 1 km à l'intérieur d'une montagne	Depuis 1984

Figura 52

Résultat typique de la modélisation du mouvement à long terme des matières radioactives à travers la géosphère

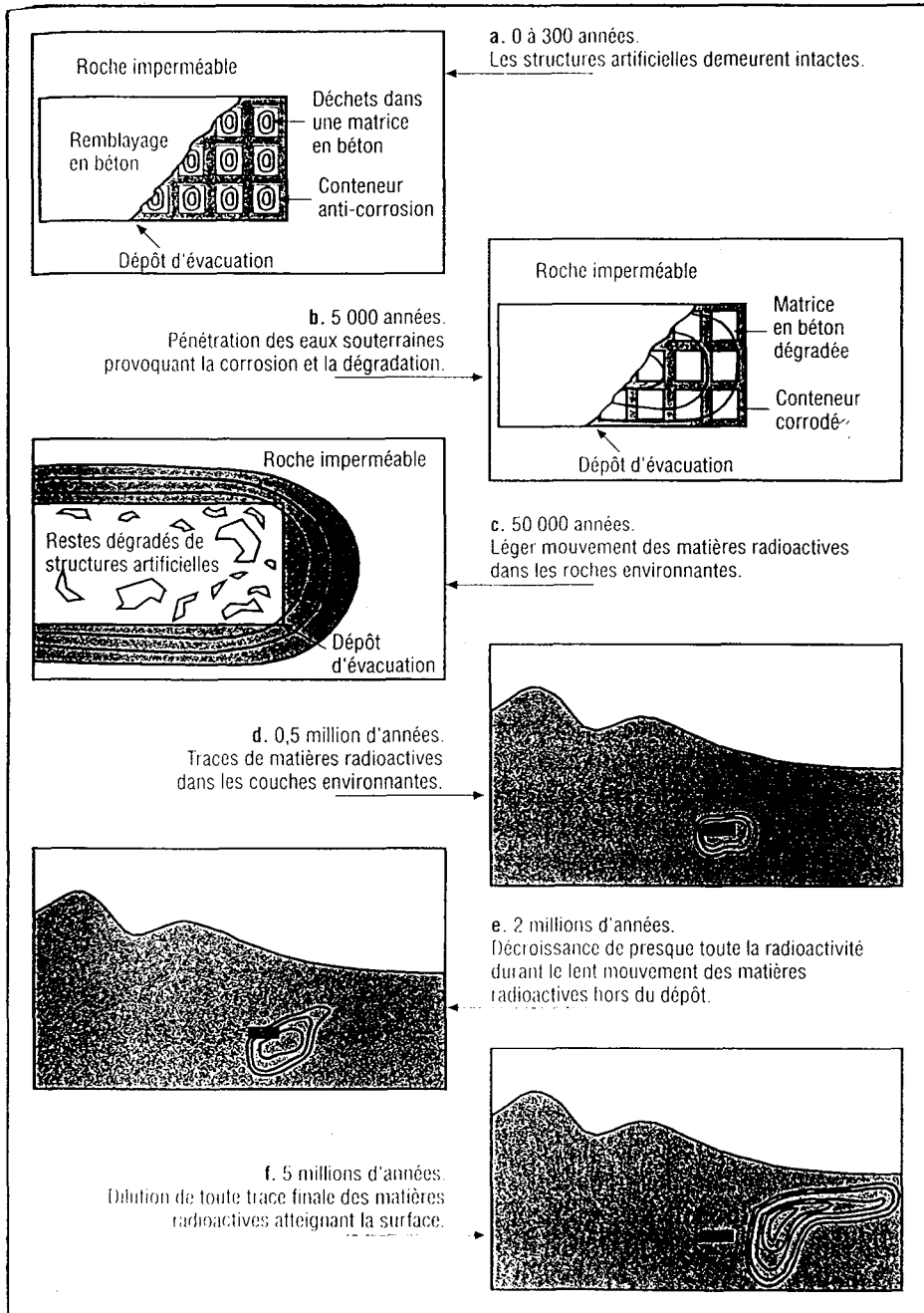
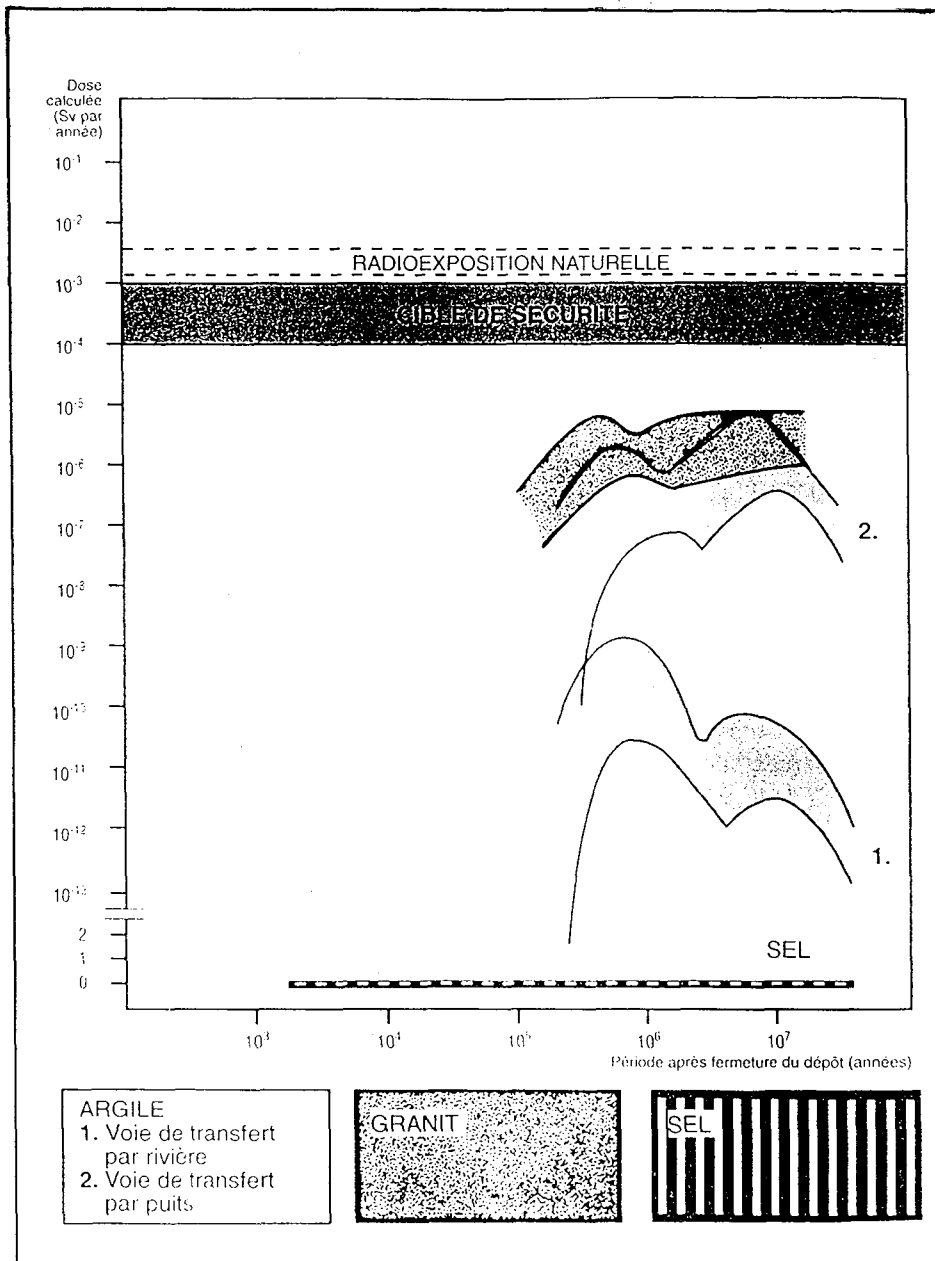


Figura 53



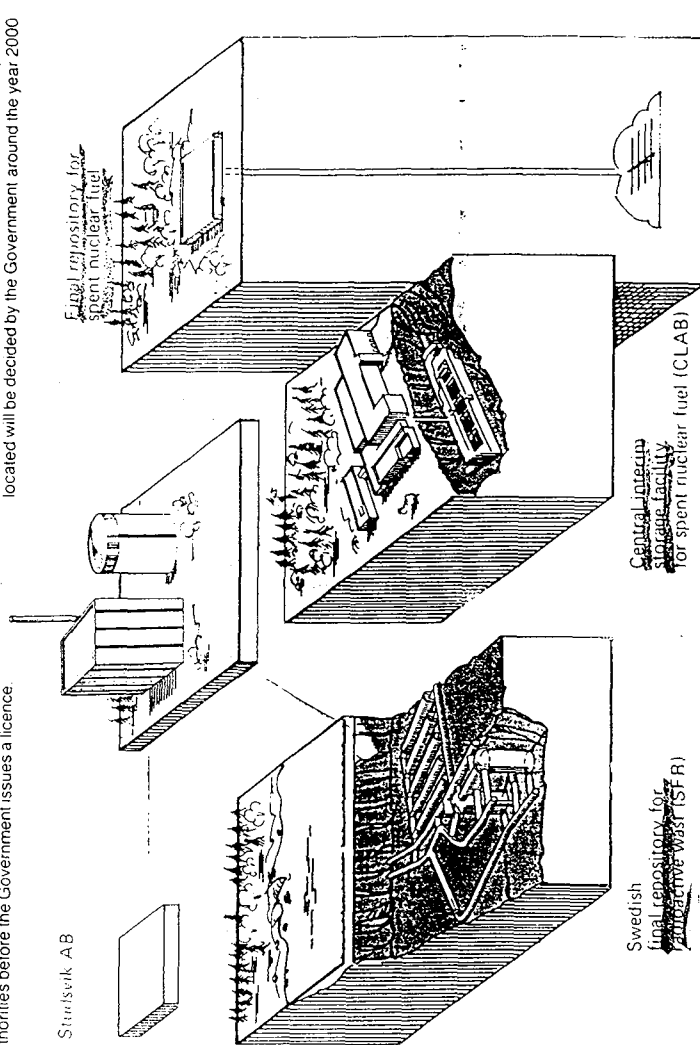
Résumé de certains résultats de l'étude PACIS. Les doses de rayonnement calculées sont forcément nulles pour les quelque 100 000 ans après la fermeture. Les doses les plus élevées ne seraient atteintes qu'après quelques millions d'années. Les niveaux de débit de dose, compte tenu des incertitudes, se situent bien en deçà des cibles de sécurité établies et des doses attribuables au fond naturel de rayonnement.

Figura 54

Short-lived waste to SFR.

It is estimated that the low- and intermediate-level operational waste from the nuclear power plants, Studsvik and CLAB will amount to a total of 90,000 m³ by the year 2010. In the future – after the year 2000 – SFR may be expanded to accommodate radioactive decommissioning waste from the nuclear power plants. Such an expansion will require a special review by the authorities before the Government issues a licence.

Studsvik AB



Long-lived waste to CLAB.

The long-lived waste generated by nuclear power consists mainly of spent fuel that has been stored for about 40 years in CLAB at Oskarshamn. The spent nuclear fuel will then be placed in a final repository. Current plans call for construction of this special repository approximately 500 metres below the surface in the Swedish bedrock. Where in Sweden this final repository will be located will be decided by the Government around the year 2000.

Debe recordarse para tener en cuenta los valores de dosis que se manejan que las dosis media anual de la radiactividad natural es de 2,4 milisievert ($2,4 \times 10^{-3}$ Sv) y que se estiman en 1 mSv adicional todas las aportaciones humanas, de las que las debidas a las aplicaciones médicas son el 90%.

Quizá más cercano a la experiencia actual un vuelo Madrid-Nueva York significa para pasajeros y tripulantes una dosis debida a la radiación cósmica de 5 microSievert (5×10^{-6} Sv).

No hay en la actualidad ningún almacenamiento definitivo de residuos de alta actividad. En todos los países con centrales nucleares se desarrollan proyectos como los citados en la figura 51 o se siguen las investigaciones y estudios del resto de los países interviniendo en algunas de sus fases.

En opinión de muchos, el país que con mayor probabilidad dispondrá de él es Suecia que cuenta ya con un almacén definitivo de residuos de baja y media radiactividad y de un almacenamiento temporal centralizado de combustible gastado, tal como aparece en la figura 53. En los dos casos se trata de almacenamientos subterráneos en roca primaria, que han servido de experiencia para la futura instalación del almacenamiento de los residuos de alta actividad, prevista en el mismo tipo de roca a 500 metros de profundidad, para cuya construcción el Gobierno sueco tomará la decisión correspondiente el año 2000 y ya cuenta con municipios dispuestos a ser su emplazamiento.

Esta disposición favorable no es corriente en Europa donde los residuos radiactivos suelen ser considerados por la opinión pública como más peligrosos que las propias centrales nucleares.

Hemos tratado de presentar este problema como solucionable con la tecnología actual de forma que los radionucleidos contenidos no constituyan un riesgo para el ambiente o los seres vivos aún con las incertidumbres ligadas al largo tiempo que debe cubrirse.

Abordar una solución es un problema social y de opinión pública que, como otros muchos, demanda una tarea de información objetiva y finalmente de adoptar una decisión política, por impopular que pudiera ser.

La fusión nuclear

Como su nombre indica, la fusión nuclear es la unión de núcleos ligeros para formar núcleos de mayor masa. Es, por tanto, el proceso opuesto a la fisión y se diferencia de ella en muchos extremos.

La fusión tiene un carácter noble. Es la que hace brillar las estrellas y de la que el Sol extrae la energía que nos envía. Obtiene sus materias primas, casi ilimitadas, del agua. No produce residuos radiactivos de alta actividad y su futuro funcionamiento tendrá una mayor seguridad porque no dependerá de ninguna masa crítica.

El mayor obstáculo que presenta es precisamente la dificultad de llevarla a cabo. Su comercialización es como la imagen de un oasis en una espejismo. A pesar de todos los esfuerzos sigue estando lejos.

Ya en la década de los 20 se intentó obtener Helio, necesario entonces para los zeppelines alemanes, a partir de Hidrógeno, y lo mismo se intentó en los 30 a partir de Deuterio. En esta década de los 30, en Inglaterra se obtuvo Tritio bombardeando con Deuterio, pero se consideró que energéticamente el resultado era negativo.

Comencemos por el origen. La curva de energías de enlace de los diversos elementos en función del número atómico, véase la figura 55, muestra que el defecto de masa, obtenido al comparar la masa de los núcleos pesados con la de los neutrones y protones que los forman, es siempre positivo hasta números atómicos del orden de 55-60, lo que se traduce en una gran energía al fusionar elementos ligeros según indica la ecuación de Einstein.

De una manera sencilla 1 gramo de Deuterio equivale teóricamente a 10 gramos de Uranio-233, Uranio-235 o Plutonio-239, a algo más de 6 toneladas de petróleo y a unas 10 toneladas de carbón.

Teniendo en cuenta que la abundancia natural de Deuterio en el agua es de 150 partes por millón y que el volumen de agua en la Tierra es de unos 775 millones de Km. cúbicos, las reservas de Deuterio son de unos 116 billones de toneladas, que al ritmo actual de consumo mundial de 8.000 millones de tep supondría tener asegurado el suministro durante muchos miles de millones de años, es decir, para más de los 5.000 millones de años que se estima durará el Sol. No importan, por tanto, errores grandes en las estimaciones del Deuterio o de la demanda energética, ni tampoco que esta última crezca intensamente en el futuro. El hecho innegable es que la solución de la fusión nuclear resolvería para siempre los problemas energéticos de la Humanidad.

Lo mismo que en otras reacciones, como las químicas, para que tengan lugar las reacciones nucleares es preciso que los núcleos estén en contacto o a distancia conveniente para vencer las fuerzas de repulsión entre ellos y que se sobrepase la energía necesaria para vencer la barrera de potencial.

Las dimensiones son aquí otras, sin embargo. Por ejemplo, un átomo de Carbono tiene un tamaño del orden de 0,01 nanómetros 10⁻⁹, mientras que su núcleo es del orden del femtómetro (10⁻¹⁵), lo que da origen a la conocida comparación de un gramo de arroz (el núcleo) en el centro de un campo de fútbol (el átomo).

De manera simplificada, las dos fuerzas que intervienen en la estabilidad de los núcleos son las nuclear, atractiva entre protones y neutrones, que disminuye exponencialmente con la distancia y actúa sólo hasta unos 2 femtómetros, y la electromagnética, de repulsión entre protones y neutrones, que disminuye mucho más lentamente, proporcionalmente a la inversa del cuadrado de la distancia. La energía para vencer las fuerzas que retienen los nucleones en los núcleos es proporcional al producto de las cargas de los núcleos que se desea unir.

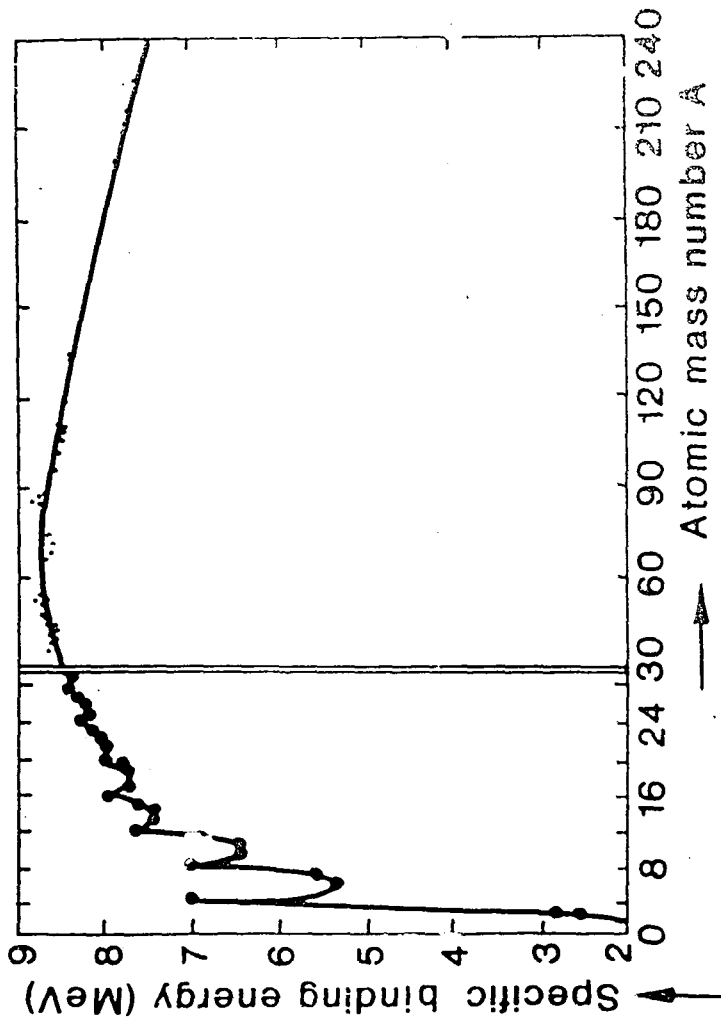
Esta energía se logra elevando la temperatura. Pero, por encima de los 10.000 grados, los electrones y los núcleos se separan, obteniéndose el estado de plasma, cuarto estado de la materia y el más abundante del Universo, ya que es en el que están todas las estrellas.

Es evidente también que para que la reacción lugar no sólo se requiere una temperatura alta que se estima en unos 40 millones de grados o por consideraciones prácticas de más de 100 millones, sino que también se requiere una concentración determinada de núcleos y que el contacto se establezca durante un tiempo suficiente.

Las reacciones nucleares más importantes entre los elementos ligeros se presenta en la tabla 41, donde se han destacado la reacción más sencilla de llevarse a cabo, A, y la de obtención de Tritio a partir de Litio-6.

En la reacción A, por ejemplo, la energía de los deuterones debe ser de 4 keV, equivalente a los citados 40 millones de grados, y de la reacción se obtiene 17,6 MeV, que se distribuyen en un 20%, 3,5 MeV, que van con el Helio, y un 80%, 14,1 MeV, que van con el neutrón.

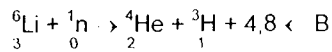
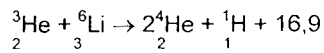
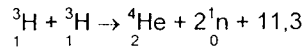
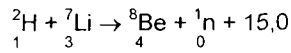
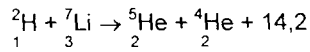
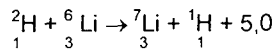
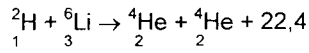
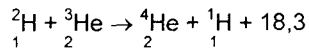
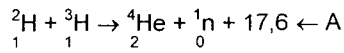
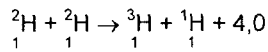
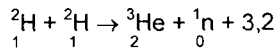
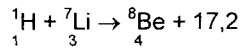
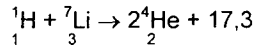
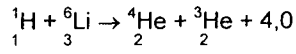
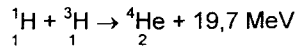
Figura 55



Specific binding energy vs. the atomic mass number.

Tabla 43

REACCIONES DE FUSION



El mantenimiento de las condiciones de la reacción en lo que se refiere a concentración y temperatura sólo puede lograrse si se evita su tendencia a la expansión. Es precisa su confinación, mediante un control del plasma. Sin control la reacción es explosiva y se obtiene la llamada bomba de Hidrógeno u otras armas derivadas de ella, que no trataremos aquí.

El confinamiento del plasma se logra en las estrellas gracias a la gravitación y a su gran masa. Es obvio que ello no se puede realizar en la Tierra, por lo que hay que acudir a otras dos propiedades más a nuestro alcance, el confinamiento magnético del plasma y el confinamiento inercial.

El confinamiento magnético fue empleado inicialmente por I. Tamm y A. Sakharov, en la Unión Soviética en los años 50 y desvelado en la conferencia de Ginebra para Usos Pacíficos de la Energía Nuclear del año 1958. La configuración elegida recibió el nombre de Tokamak, a partir del ruso cámara toroidal de confinamiento magnético, cuya idea básica es sencilla y bastante menos su realización experimental.

Imaginemos un largo cilindro horizontal en cuyo interior hay un campo magnético uniforme paralelo al eje del cilindro. Si por un extremo entran partículas cargadas éstas se moverán helicoidalmente alrededor de rectas paralelas al eje.

En el Tokamak ideal se prolongan las trayectorias y, por tanto, el tiempo de residencia, doblando el tubo, cerrándolo sobre sí mismo y convirtiéndolo en un toro, en un anillo de sección circular.

El Tokamak práctico requiere tres tipos de electroimanes. Un transformador central en el eje del toro, induce una intensa corriente eléctrica que provoca la ionización del gas y su calentamiento hasta formar el plasma que circula en dirección del toro. Una serie de bobinas que rodean el toro producen el campo toroidal. (véanse las figuras 56 y 57, para una idea más detallada). El movimiento circular de las partículas provoca una deriva vertical que haría llegar el plasma a la pared, lo que es preciso evitar y se consigue mediante otra serie de electroimanes alrededor de las anteriores que crean un campo vertical, llamado también poloidal, que da forma y estabiliza la posición del plasma.

Al comienzo de las investigaciones sobre fusión se idearon dispositivos muy variados para lograr el confinamiento magnético, de los que sobreviven unos pocos además del tokamak. El más conocido es el stellarator propuesto por L. Spitzer también en los 50 en Estados Unidos, cuya configuración solamente difiere del tokamak en que las bobinas exteriores crean los campos necesarios. Uno de los últimos modelos construidos ha sido el TJ-II del CIEMAT en nuestro país. Tanto en el tokamak como en el stellarator se completa el calentamiento del plasma con sistemas auxiliares que suelen consistir en la inyección de átomos neutros de Deuterio con energía elevada o en la entrada de ondas de alta frecuencia.

Una de las más antiguas investigaciones es la utilización del pinzado, en inglés Z-pinch, iniciado ya en los años 50, que consiste en hacer pasar una corriente muy intensa del orden de un millón de amperios entre dos electrodos situados en los extremos de un tubo lleno de gas, convirtiendo el gas en plasma, calentando a éste por efecto Joule y confinándolo en el tubo. Sin embargo, el sistema es inestable haciendo que la columna del plasma se parezca más bien a una sarta de salchichas o chorizos.

A pesar de todas las modificaciones introducidas el método sigue siendo una esperanza lejana.

Figura 56

The tokamak magnetic field configuration is built up from three components. The first of these is produced by a set of coils around the minor circumference. These coils produce the toroidal magnetic field around the major axis of the machine. The second component (poloidal field) is produced by transformer action. The combination of these produces a helical magnetic field which keeps the plasma away from the vessel walls. The final component is generated by a set of hoop coils, which is used to shape and stabilise the position of the plasma.

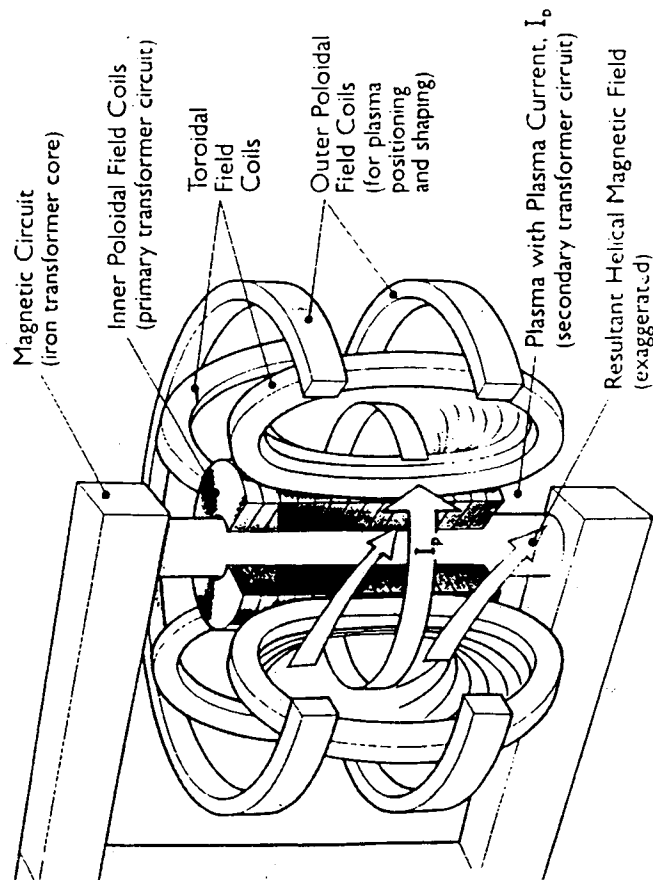
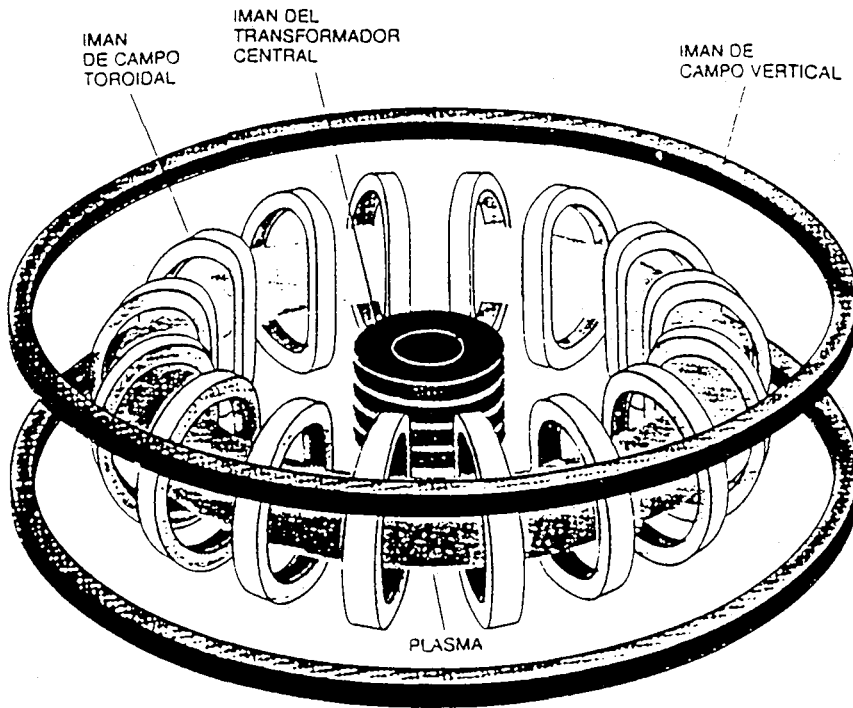


Figura 57



3. LA NOCIÓN DE TOKAMAK se basa en tres juegos de electroimanes. Una serie de bobinas produce un campo toroidal que actúa de conducto tubular para confinar el plasma. Las bobinas del transformador central inducen una corriente eléctrica que circula por el plasma siguiendo la dirección toroidal y lo calienta. Las bobinas de campo vertical mantienen centrado el plasma y en equilibrio estable.

En la práctica la configuración tokamak es la más utilizada de todas las empleadas para el confinamiento magnético, si bien la sección recta circular del Toro ideal se sustituye por figuras que tienen más hacia una D, tal como aparece en la figura 58, con el fin de conseguir más fácilmente el aislamiento físico del plasma.

La necesidad del aislamiento térmico y de que el plasma no llegue a tocar las paredes del toro durante un tiempo suficiente debe recordarse ahora puesto que todo el funcionamiento para conseguir un plasma estable depende esencialmente de tres variables, temperatura, densidad y tiempo, cuyo producto, el llamado criterio de Lawson, debe alcanzar un valor determinado, en el caso del sistema Deuterio-Tritio 10^{21} keV. $\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$, para que la energía aportada sea igual a la producida.

Para un funcionamiento estable y prolongado de la instalación, sin embargo, es preciso alcanzar lo que se llama encendido o ignición, es decir, cuando el sistema se autoalimenta, lo que se obtiene para valores superiores al punto de igualación, al menos 5×10^{21} keV. $\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$, en que la aportación de la energía por el Helio producido basta para mantener la reacción.

En el confinamiento inercial se prescinde de alcanzar un estado estacionario. Se hacen llegar simultáneamente a una pequeña bola gaseosa de Deuterio-Tritio haces luminosos o de partículas de modo que se produzca en la microbola una reacción de fusión nuclear.

El método más corriente de aportar la energía necesaria para la reacción es mediante láser. El blanco normalmente consiste en una esfera hueca de Deuterio-Tritio sólido que encierra un gas de la misma composición y que está recubierto de un material sólido de ablación, teniendo el conjunto 3 mm como máximo de diámetro.

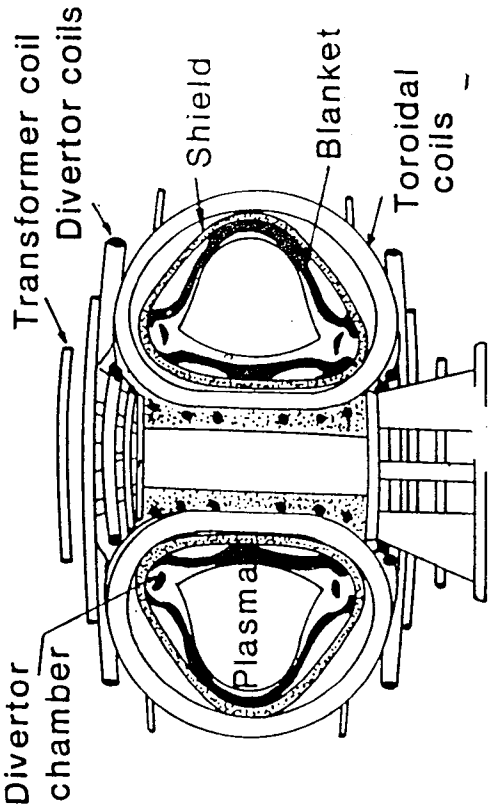
Por la acción del láser y de los rayos X que se emiten al chocar el láser con la microbola se producen en la microbola en escasos nanosegundos los siguientes procesos: 1. Absorción de la energía del láser por el material de ablación con la consiguiente volatilización de éste; 2. Frente a la acción de la volatilización de produce una reacción que da lugar a una implosión a gran velocidad; 3. Tiene lugar la compresión y calefacción del gas; 4. Aparece la fusión nuclear.

Estos procesos debieran repetirse con una cierta cadencia pudiéndose equiparar al martilleo de un motor de explosión.

Aunque la idea inicial del confinamiento inercial es también rusa, los países más avanzados actualmente son Estados Unidos y Japón. De Estados Unidos ha surgido la idea de emplear microbolas huecas que dan mejores resultados que las sólidas y de Alemania el empleo de un recubrimiento con Oro del interior de un recinto llamado "hohlraum" que encierra la microbola y dejar que el láser penetre en la cavidad por orificios, de modo que el oro actúe como convertidor de frecuencia, ya que con los rayos X obtenidos la distribución de energía es más homogénea que con el láser.

El rendimiento es por ahora bajo. Primero, por la conversión de electricidad en láser, que es del 5%, y después por el bajo rendimiento en el ciclo térmico de la microbola, 30%. También son insuficientes la aportación de energía, aunque se espere mejorarla por el paso de los láseres de vidrio (neodimio) a los de gas (KrF) y la cadencia práctica de los disparos.

Figura 58



A section through a TOKAMAK INR.

Otro método de lograr la implosión es mediante haces de partículas, lo que representa para muchos la mejor alternativa al confinamiento magnético. Al igual que el láser, tiene este método la ventaja de separar físicamente la aportación de la energía necesaria de la generación de la fusión, lo que representa una ventaja para la recuperación de la energía ya que la aportación de energía es independiente de los neutrones producidos, evitándose así los efectos de la radiación, esfuerzos térmicos y activación.

Para la selección del haz a emplear conviene tener en cuenta que las partículas deben llegar a tal velocidad que compriman la microbola sin atravesarla. En dicha selección intervienen el tipo de partícula (protones, iones ligeros, iones pesados), su energía cinética y la intensidad del haz.

La consecución de la fusión requiere dar a la microbola unos 5 mJ entre 10 y 20 nanosegundos, lo que significa potencias del orden de 250 a 500 TW que evidentemente no están aún disponibles. Para conseguirlo, empleando protones o iones ligeros, habría que disponer de energías bajas y elevadas intensidades. Con iones pesados sería al contrario, energías altas e intensidad baja. Las dos modalidades supondrían aceleradores diferentes.

Parece más prometedor el empleo del acelerador de iones pesados, pero sería precisa una intensidad superior, unos 1.000 veces a las de los aceleradores actuales. Estudios conceptuales del tipo denominado como Hiball que emplea iones de Bismuto y varios aceleradores en serie necesitan aún de confirmación experimental.

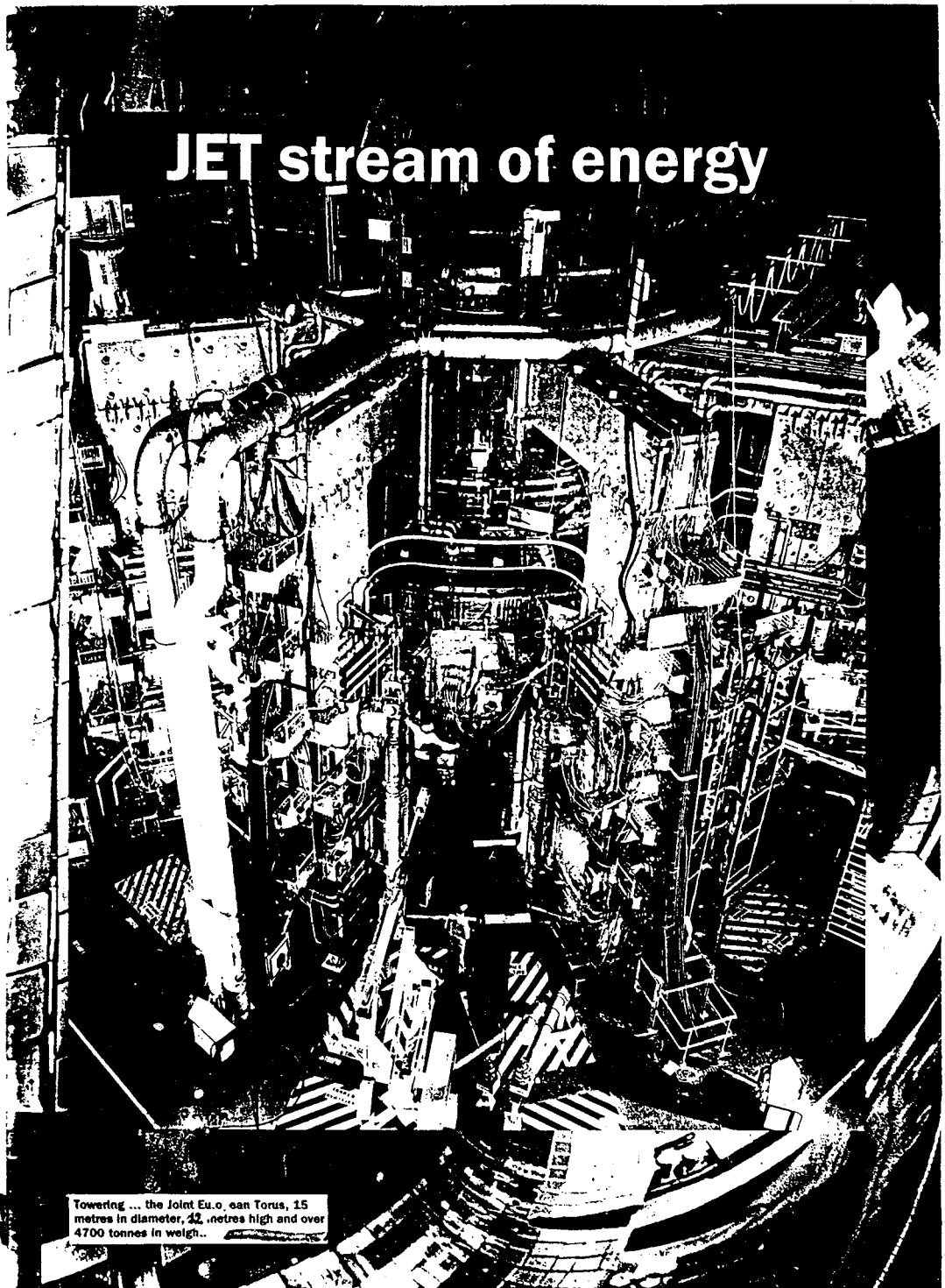
En cualquier caso, los sistemas todos de recuperación de energía y de producción de tritio o de isótopos fisionables, si se tratara de un sistema con materiales fértiles en vez de Litio-6, tienen que resistir explosiones equivalentes a cientos de kg de trinitrotoluno varias veces por segundo, asunto que, a efectos de diseño, no es baladí.

Todas las instalaciones de fusión, sean instrumentos de investigación o prototipos, si son completos, han de utilizar técnicas de punta en la creación de campos magnéticos o empleo de láseres o aceleradores, en los que las intensidades de la corriente eléctrica empleada hacen casi imprescindible el uso de superconductores.

Además de la consecución de la estabilidad del plasma, el problema más importante que tienen planteadas todas las configuraciones es el de los materiales de construcción. En el confinamiento magnético de la pared ha de recibir un enorme flujo de calor. Basta pensar que el plasma debe estar a 100 millones de grados y la pared alrededor de 1.000 y que el flujo de calor por radiación es proporcional a la diferencia de la cuarta potencia de las temperaturas. Este calor debe ser eliminado continuamente para que no suba la temperatura de la pared. En el confinamiento inercial a este problema de transmisión y eliminación del calor, aunque sea cíclico, se suma el efecto discontinuo de la presión que ha sido absorbido por los materiales todos alrededor de la microbola.

Por si estos problemas fueran banales, los neutrones de elevada energía -14,1 MeV en el caso de la reacción Deuterio-Tritio- no sólo pueden activar y hacer radiactivos a muchos de los elementos que puede haber en la pared, sino que además en sus choques arrancan átomos y grupos de átomos y cambian al ceder su energía por choque las propiedades de los materiales que encuentra. Estos efectos tienen consecuencias sobre el propio plasma, en que los átomos arrancados lo impurifican y lo hacen inestable, y sobre la vida de la pared, que acelera la necesidad de su sustitución, estimada entre 4 y 10 años, según la composición de los diversos materiales que la forman.

Figura 59



La pared no sólo debe impedir la impurificación del plasma y absorber el calor que aportan los neutrones que llegan a ella, sino que, si ha de ser eficaz, debe aprovechar estos neutrones para obtener el Tritio que se requiere en la reacción principal. La pared ha de tener por tanto una zona exterior donde los neutrones, perdida ya una gran parte de su energía, sean absorbidos por Litio o por cualquier otro elemento que pueda generar Tritio o si así desea, por otro tipo de consideraciones, por Uranio-238 o Torio-232 para generar Plutonio-239 y Uranio-223.

La pared ha de tener, por consiguiente, una múltiple y complicada funcionalidad y de ahí su importancia.

Funciones análogas ha de desempeñar la pared en el confinamiento inercial a la cual hay que agregar la resistencia mecánica para atenuar la presión y el martilleo.

Para que el plasma pueda seguir siendo estable en el confinamiento magnético deben separarse las impurezas mediante diversos artificios. Uno de ellos, es el empleo de cámaras de vacío donde se desvía el plasma periférico, pero la mejora que ha dado buenos resultados para controlar la interacción plasma-pared ha sido el cambio de limitadores mecánicos por la creación de superficies magnéticas con uno o dos puntos de campo magnético poloideal nulo dentro de la cámara de vacío. En el confinamiento inercial los dispositivos son de tipo mecánico.

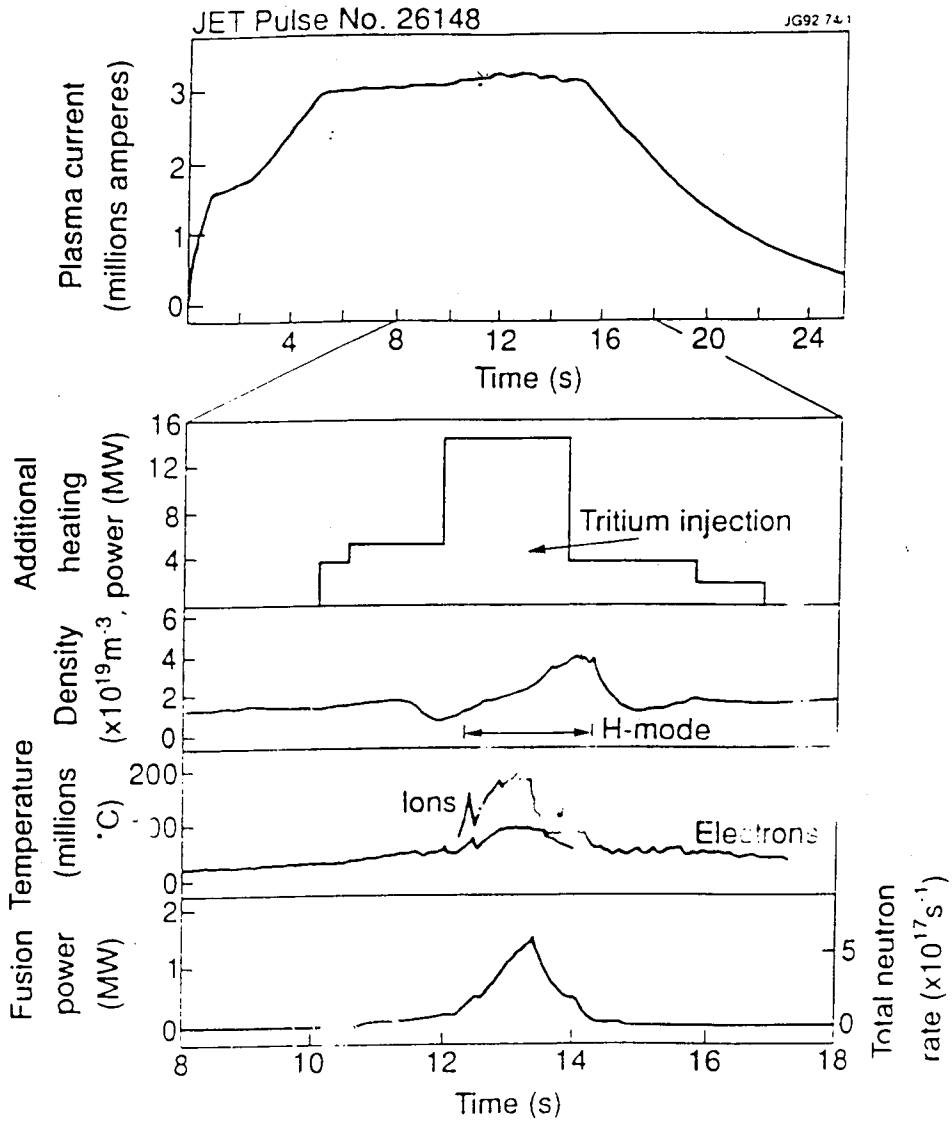
Hasta la década de los 70 el número de tokamaks construidos en el mundo fue muy grande, pero en todos ellos se pudo apreciar la necesidad de construir un tokamak suficientemente grande para investigar plasmas en condiciones semejantes a las requeridas en la reacción de fusión. Según esto Estados Unidos construyó el llamado TFTR, Japón el JT-60, la Unión Soviética el T-15 y la Comunidad Europea el llamado Joint European Torus o abreviadamente, JET, que situó el Culham, Reino Unido (véase figura 59).

De 15 m de diámetro, 12 m de altura y con algo más de 4.700 toneladas de peso, el JET comenzó a funcionar en 1983 habiéndose demostrado en él, lo mismo que en los otros tokamaks grandes, que había posibilidades de alcanzar la igualación de energías, break-even, es decir, la factibilidad científica, si se construía una nueva máquina, ya que se habían confirmado las leyes de cambio de escala de los tokamaks pequeños, las dificultades de las impurezas y los problemas de su separación, así como se habían resuelto numerosas cuestiones relacionadas con la estabilidad del plasma y su calentamiento. Durante este tiempo se había trabajado en condiciones que no dieron lugar a activación radiactiva del toro y se habían así podido introducir numerosas modificaciones en el diseño inicial.

A finales de 1991 se inyectó Tritio en un plasma Deuterio-Deuterio y se pudo comprobar una producción de neutrones equivalente a una potencia de fusión de alrededor de 1,5 MW durante unos dos segundos (véase figura 60). El experimento probó que se podía controlar la fusión, aunque no se intentó conseguir la igualación de energías, lo que hubiera requerido una mezcla de Deuterio y Tritio al 50% y sólo se inyectó rítio al 13%.

A la vista de estos resultados y de los obtenidos en los restantes grandes tokamaks y del coste de un tokamak que hiciera posible el éxito científico de lograr la igualación de energías aportada y obtenida, se propuso la construcción de una sola máquina, proyecto ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor, en el que incluso se pudiera llegar a la ignición. Los cuatro países decidieron comenzar la fase de diseño del reactor y asistimos ahora a la fase de ingeniería, que se distribuye entre ellos.

Figura 60



Results of the deuterium – tritium experiment in JET

El reactor tendrá una altura de 25 m y una cámara de 4,3 por 8,4 m. No se ha decidido aún dónde será situado y las dificultades financieras están retrasando considerablemente las fechas iniciales previstas para su construcción y funcionamiento.

En el ITER se aprovecha la experiencia del JET en el que la primera pared fue inicialmente de Inconel, que impurificaba el plasma con Níquel, después recubierta con Carbono y finalmente con placas de grafito. La utilización de composites con fibra de Carbono, de superconductores de aleaciones, por ejemplo, de Niobio y Estaño, embutidas en Cobre indica el avance en el uso de materiales entre un diseño y otro. La producción de Tritio se hará con bolas de óxido o aluminato de Litio situadas dentro de tubos de acero inoxidable y será arrastrado con Helio a medida que se forme. El resto de las características constituirán extrapolaciones del JET. Un esquema del ITER se da en la figura 61.

Los resultados de los primeros tokamaks y de otras configuraciones se dan en la figura 62, en la que también aparecen la curva (a) de igualación de energías, break-even o fusión Deuterio-Tritio, así como la (b) de ignición para dicha mezcla y la (c) de ignición para la mezcla Deuterio-Deuterio. Puede comprobarse también que los grandes tokomaks, señalados por los números 10, 11, 12 y 13, no aspiraban a lograr la ignición de energía, sino a adquirir los datos y experiencia que entonces faltaban.

En la figura 63, por el contrario, se dan resultados obtenidos con ellos, JET, TFTR, JT-60, por ejemplo, y se representa el campo, ya dentro de la ignición del futuro ITER.

Esquemas significativos de futuros reactores de fusión, con confinamiento magnético e inercial, respectivamente, se dan en las figuras 64 y 65. Las respectivas geometría, tórica y esférica, distinguen claramente ambas configuraciones.

He dejado a propósito para el final el sorprendente caso de la llamada “fusión fría”, que alcanzó una gran difusión entre investigadores y el público durante los años 89 y 90.

Hemos visto hasta ahora que las investigaciones sobre fusión requieren grandes y complicados aparatos, equipos formados por un gran número de expertos en temas diversos, técnicas muy avanzadas y equipos e instalaciones de alto coste. El 23 de Marzo de 1989 en una conferencia de prensa celebrada en Salt Lake City, Utah, estado mormónico de Estados Unidos, dos investigadores, Martin Fleischmann y Stanley Pons, asombraron al mundo con un nuevo milagro. En un laboratorio normal de Química, en un tubo algo mayor que un tubo de ensayo, a temperatura ordinaria se había logrado una reacción de fusión nuclear con desprendimiento de energía.

Solamente se habían necesitado para ello agua pesada, Paladio y una corriente eléctrica como la que se genera en una batería de coche.

La clave de la experiencia estaba en el Paladio. Se le había utilizado como cátodo en una célula de electrolisis de agua pesada u óxido de Deuterio. Es bien conocida la gran afinidad del Paladio por el Hidrógeno, empleándose como catalizador en numerosos catalizadores de hidrogenación. Para los químicos, durante mucho tiempo, ha sido una preocupación el hecho de que el Paladio puede absorber 900 veces su volumen de Hidrógeno, aumentando su volumen casi un 10%. La forma en que el Hidrógeno está retenido en el retículo de átomos de Paladio solo modernamente, gracias a la nueva instrumentación, ha podido ser explicada.

La idea inicial de Fleischmann y Pons, tomando una idea antigua de Paneth, fue utilizar como cátodo Paladio saturado de Deuterio con un electrolito de deuteróxido de Litio, LiOD, para lograr una interacción entre el Deuterio absorbido y el Deuterio generado por electrolisis.

Figura 61

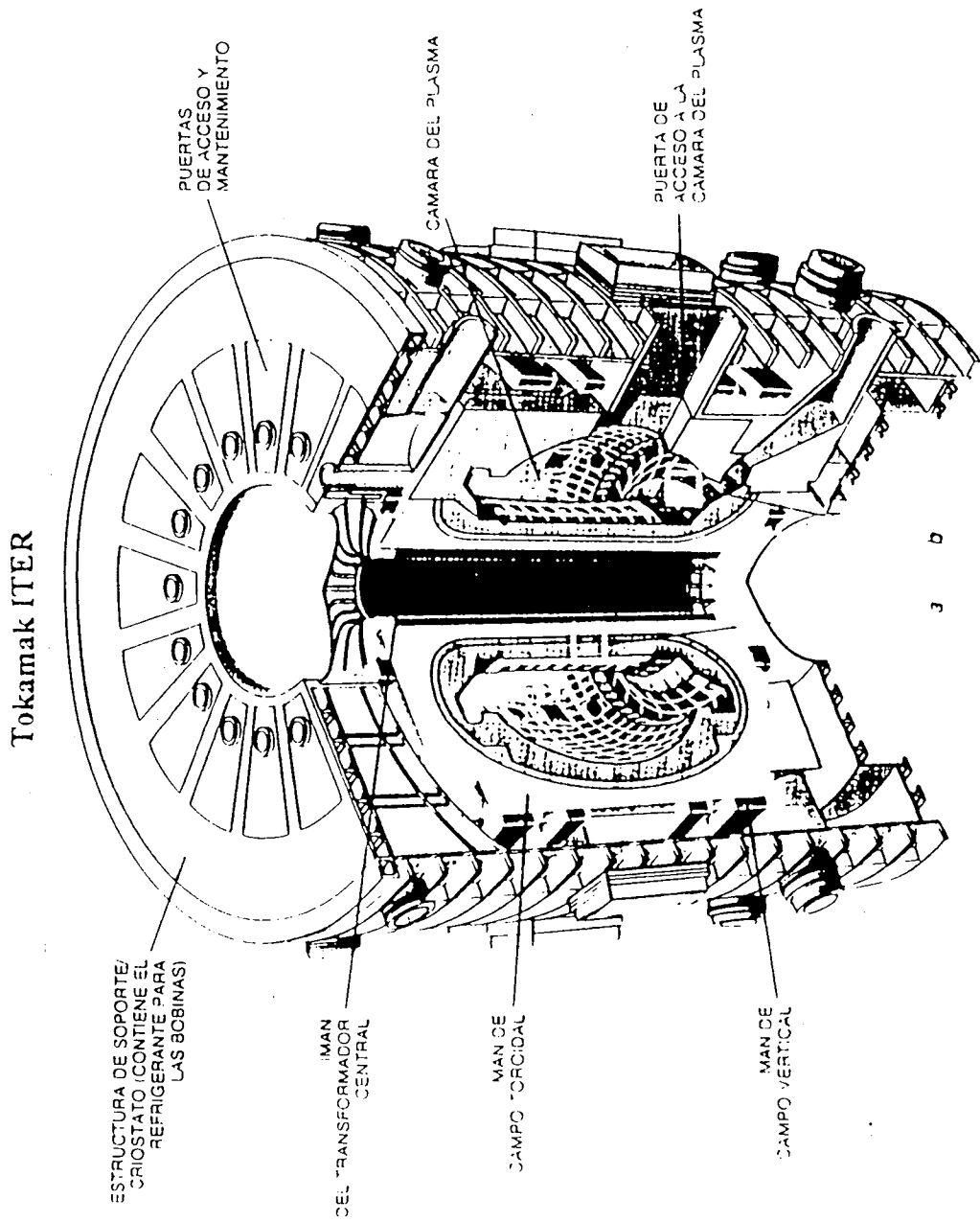
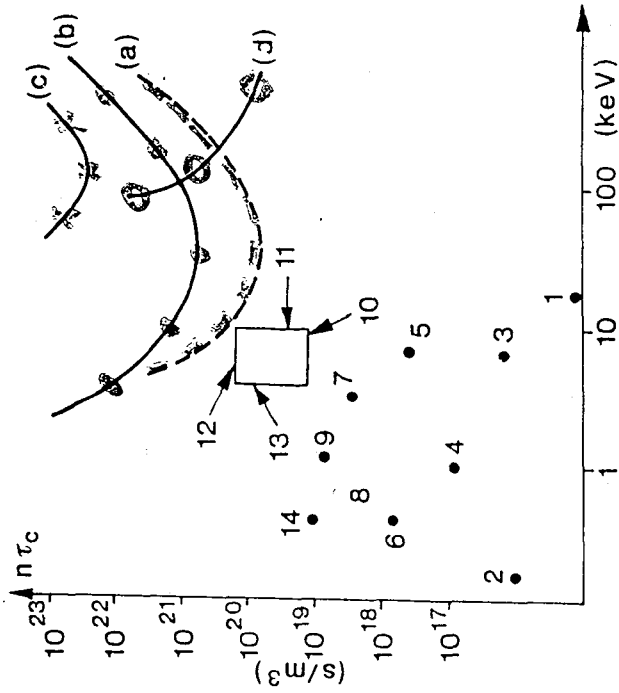


Figura 62



Parameters of leading fusion facilities: 1 - "Phoenix" magnetic mirror; 2 - Stellarator; 3 - "2X" magnetic mirror; 4 - Helical pinch; 5 - θ-pinch; 6 - TOKAMAK "ST"; 7 - TOKAMAK "PLT"; 8 - TOKAMAK "T10"; 9 - TOKAMAK "ALCATOR"; 10 - TOKAMAK "TFTR"; 11 - TOKAMAK "JT-60"; 12 - TOKAMAK "JET"; 13 - TOKAMAK "T-15"; 14 - Laser giant impulse. Positive power balance condition for: (a) D - T fusion; (b) D - T reactor; (c) D - D reactor; (d) direct conversion D - T reactor.

Figura 63

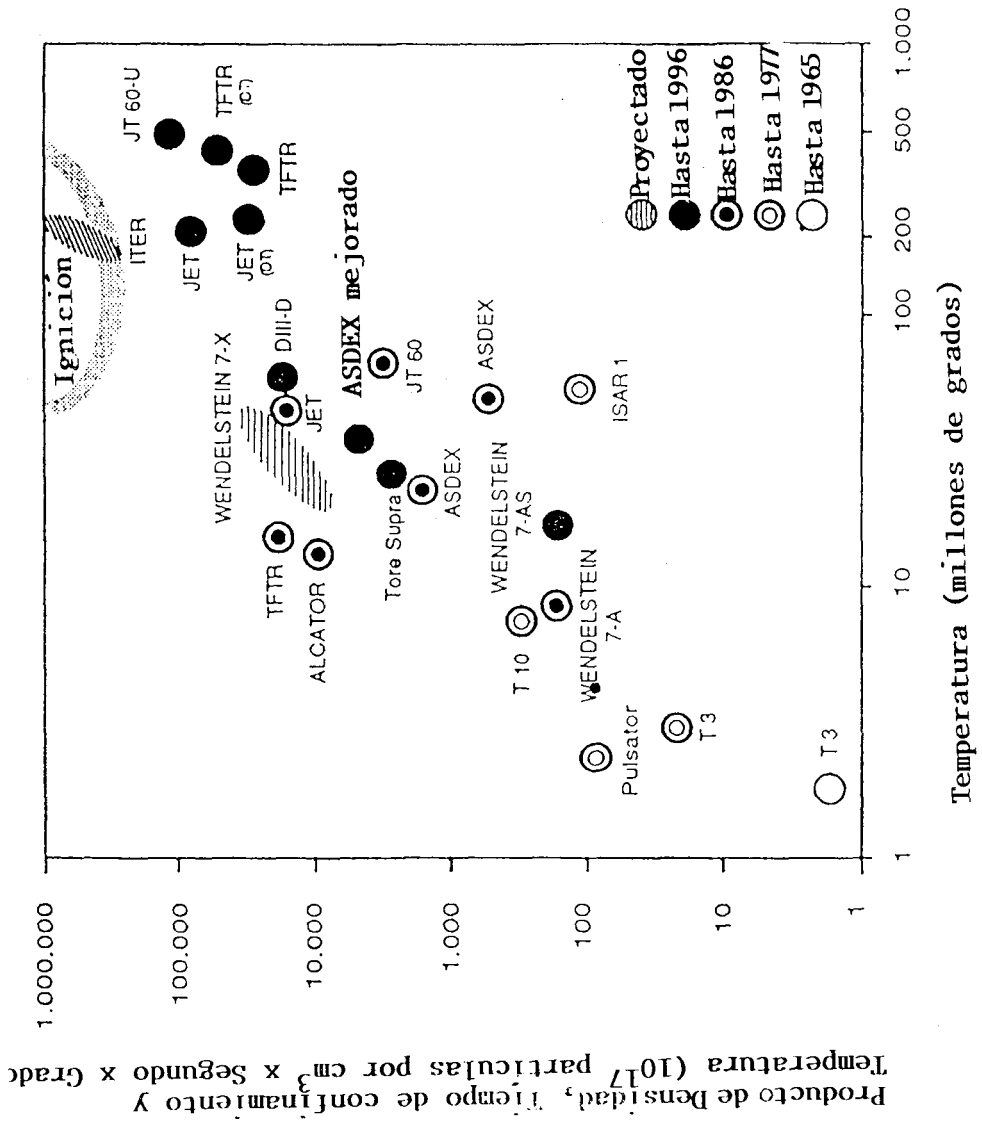
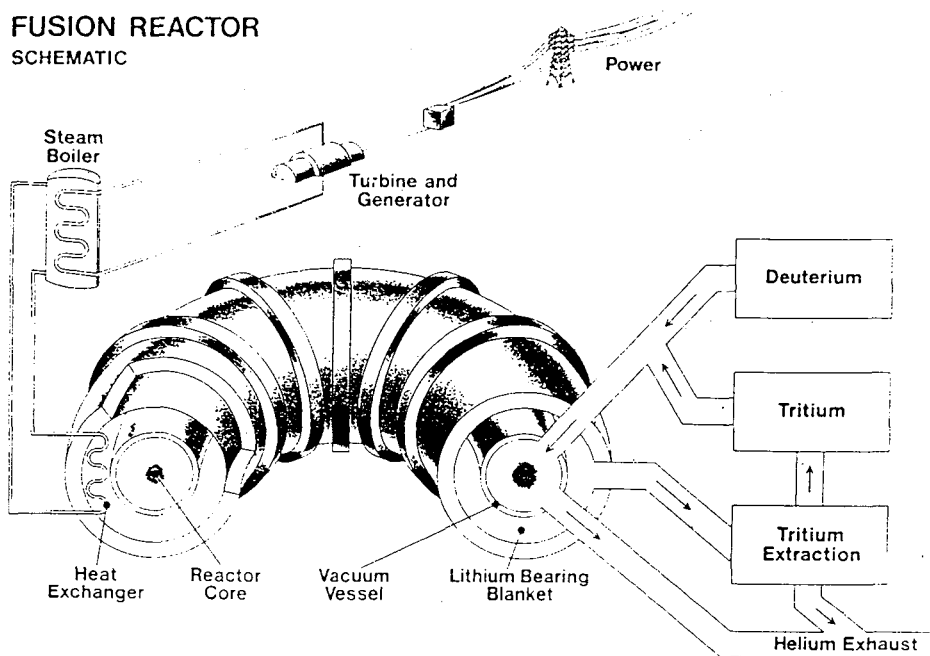


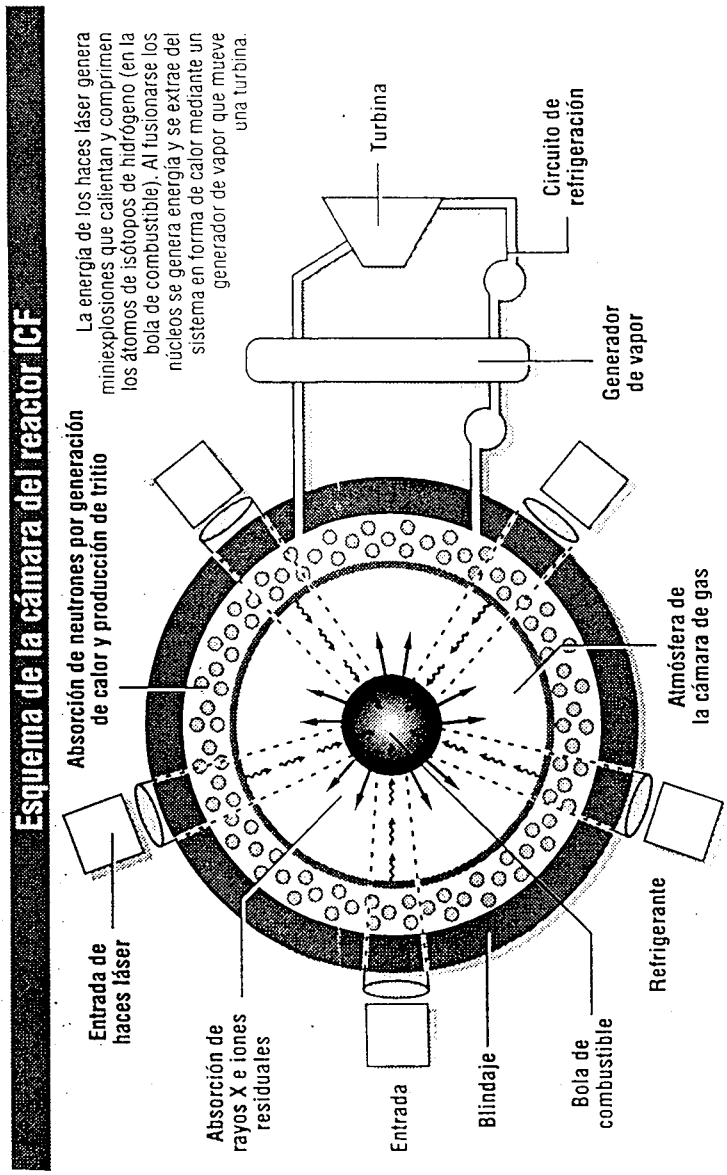
Figura 64

FUSION REACTOR
SCHEMATIC



Schematic of a future fusion reactor

Figura 65



Lo curioso de la investigación es que en otra ciudad de Utah, Provo, al mismo tiempo, un grupo de físicos dirigidos por Steven Jones y Paul Palmer construyen también una célula electrolítica y un espectómetro detector de neutrones para estudiar la reacción $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$ y seguirla mediante la determinación de los neutrones de 2,5 MeV que se producen en ella.

Al principio, Fleischmann y Pons emplean un calorímetro para medir la energía fisión y después un dosímetro de los empleados en controles de seguridad para seguir los neutrones. El dosímetro es muy rudimentario y el ruido de fondo es tenido en cuenta de manera no ortodoxa. Pero Fleischman y Pons tienen una idea ingeniosa, a la vista de que no hay indicios ciertos de que se puedan mediar así los neutrones. Colocan la célula electrolítica en un baño de agua en la que se moderen los neutrones y puedan ser capturados por los protones del agua según la reacción $n + p \rightarrow D + \gamma$, en la cual la radiación gamma emitida de 2,3 meV es fácil de medir. En un trabajo que presentan tras haber detectado gammas de 2,5 meV los cambian de energía y los dan como de 2,3 meV. ¿Fue un error? Fue un fraude?.

Por su parte, Jones ha detectado algunos neutrones y medido su energía, pero, antes de publicarlo, espera a que se aclare la situación.

Después de la conferencia de prensa, cientos de investigadores siguen las huellas de Fleischmann y Pons, dando lugar a resultados que confirman o niegan lo dado a conocer. Unos incluso reconocen sus propios errores al dar cuenta de sus resultados obtenidos demasiado rápidamente, porque ninguno de ellos quería quedarse atrás.

Finalmente se llega a una conclusión triste. No ha habido reacciones de fusión. El calor hallado se debe a reacciones químicas o de adsorción-desorción o a errores de medida. Tampoco han sido correctas las determinaciones de radiación gamma, Helio o Tritio.

En cuanto a los neutrones hallados por Jones, su valor era tan bajo que estaba muy lejos, muchas potencias de 10, del valor que se obtendría de la reacción de fusión. Sobre su energía de 2,5 MeV los resultados posteriores de otros investigadores lo confirman y otros no.

Sobre su origen, un grupo de investigadores italianos ha emitido una hipótesis que explicaría su aparición. Cuando se perturba rápidamente el sistema Paladio-Hidrógeno absorbido se observa una formación de pequeñas bolsas o cavidades donde se acumula el Hidrógeno en forma molecular, lo que da origen a defectos de alineación de la red del Paladio e incluso a la ruptura de algunos enlaces, lo que ha sido observado, por ejemplo, en el Cobre.

La separación de cargas que así se produce permite que el campo creado provoque, en el caso del Deuterio, su ionización y la aceleración de los núcleos de Deuterio hasta lograrse su fusión y generarse así los neutrones de 2,5 meV. Sin embargo, el número de neutrones que se forman por este mecanismo es bajo y concuerda con los resultados de Jones.

En cualquier caso, esta interpretación de la fusión fría no deja de ser debida a una fusión caliente y no daría lugar a aprovechamiento práctico alguno.

El futuro energético

Algunas de las tendencias actuales, que evidentemente continuarán en el futuro inmediato, fueron ya señaladas al tratar de la situación actual.

Durante la última reunión del Congreso Mundial de la Energía, celebrada en 1995 en Japón, organización no gubernamental y no comercial, que cada tres años examina el presente y el futuro de la energía, se han obtenido algunas conclusiones importantes y se han emitido algunas recomendaciones que juzgamos de interés resaltar.

Como preámbulo es de destacar que la reunión tuvo lugar en Asia, la región quizá con el más alto y continuado desarrollo del mundo, y especialmente en Japón, que importa más del 90% de su energía primaria y que ha aprendido, por tanto, a utilizar su energía de la manera más eficaz posible.

Tras señalar que el suministro de energía sigue manteniéndose estable, tanto en cantidades como en precios, destaca que la introducción de mejoras tecnológicas ha producido una mejora continuada en la generación y conversión de la energía y se han atenuado parcialmente sus efectos negativos sobre el ambiente. Pero aún no se ha logrado, añade, una contribución apreciable de las energías renovables, ni ahora ni probablemente en las próximas décadas, por lo que es preciso desarrollar un gran esfuerzo en este sentido.

Resume el Congreso Mundial de la Energía los principales retos con que se enfrenta el mundo con dos grandes objetivos:

“Uno, dar respuesta a la angustiosa situación de más de 2.000 millones de personas que habitan los países en desarrollo, que no tienen electricidad ni acceso a otra energía comercial y no pueden, en consecuencia, romper el círculo vicioso de la pobreza y dar los primeros pasos hacia su desarrollo para mejorar su nivel de vida y reducir la degradación de su ambiente”.

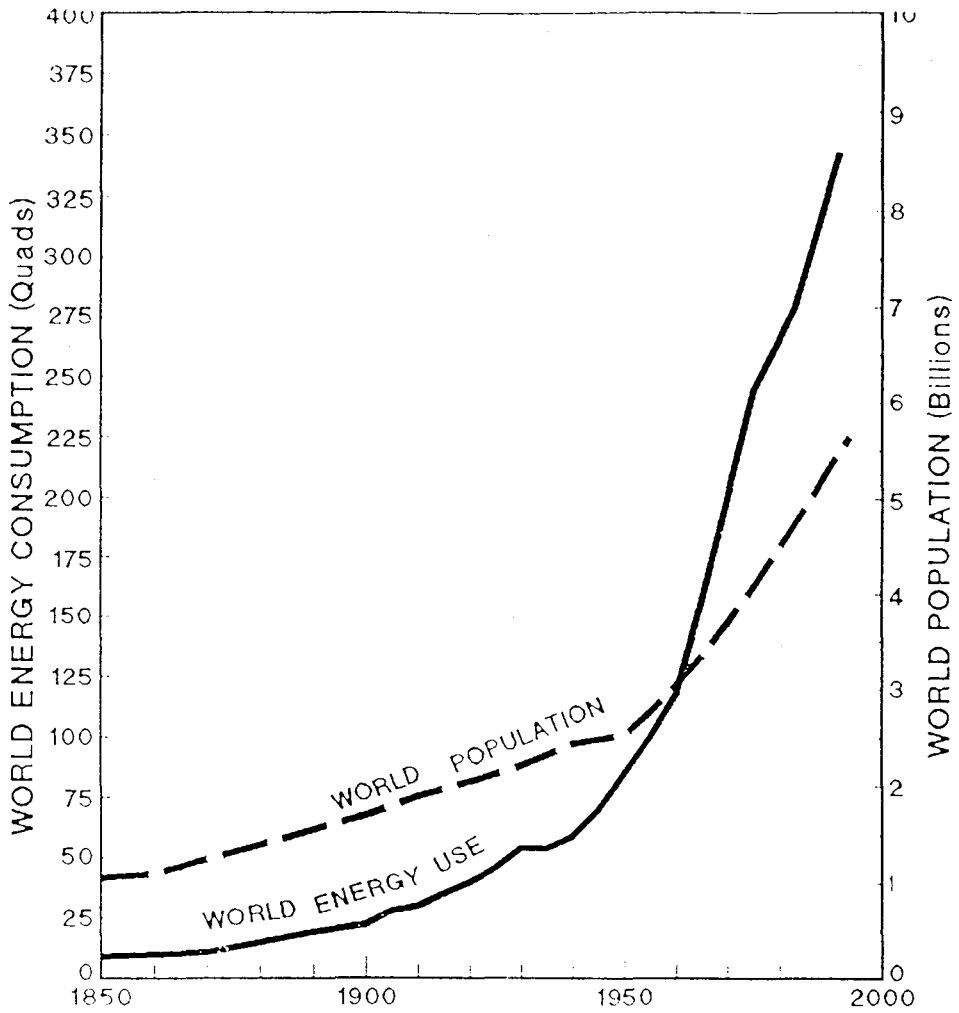
“Dos, definir una estrategia de desarrollo sostenible a largo plazo. Esta estrategia ha de tomar en consideración, por una parte, el inevitable crecimiento de la población mundial y la prioridad del desarrollo económico para que todos los pueblos tengan acceso a una calidad de vida aceptable y, por otra, afrontar el impacto sobre el ambiente a todos los niveles del desarrollo económico, con especial consideración al calentamiento del planeta y a las amenazas a la biodiversidad, efectos estos que se acentuarán particularmente en el hemisferio Sur”.

Apunta, sin embargo, el Congreso que las reservas de combustibles fósiles ofrecen la perspectiva de poder pasar unos 50 años sin grandes sobresaltos energéticos a nivel mundial y alejan la toma de decisiones para enfrentarse con el futuro, entre otras, que se eliminen los subsidios para que la energía tenga precios reales y dé lugar a las nuevas inversiones necesarias, que serán muy cuantiosas si se desarrollan los dos objetivos antes señalados. Así, el Congreso ha estimado que la financiación necesaria entre 1990 y 2020 para el sector energético mundial será de 30 billones de dólares, es decir, unos 4.500 billones de pesetas actuales ($4,5 \times 10^{15}$ pts.).

Por otra parte, esto sólo podrá conseguirse si se utiliza un abanico muy amplio de formas de energía que incluya desde los combustibles fósiles y nucleares hasta las nuevas energías renovables que son viables. Y dentro de todas ellas deberá darse preferencia a las energías más limpias y a las que ofrezcan mejores rendimientos energéticos.

Todas las predicciones apuntan hacia un aumento de la población mundial y a su destacado papel en el consumo energético. Siendo esto evidente hay que examinar la tasa

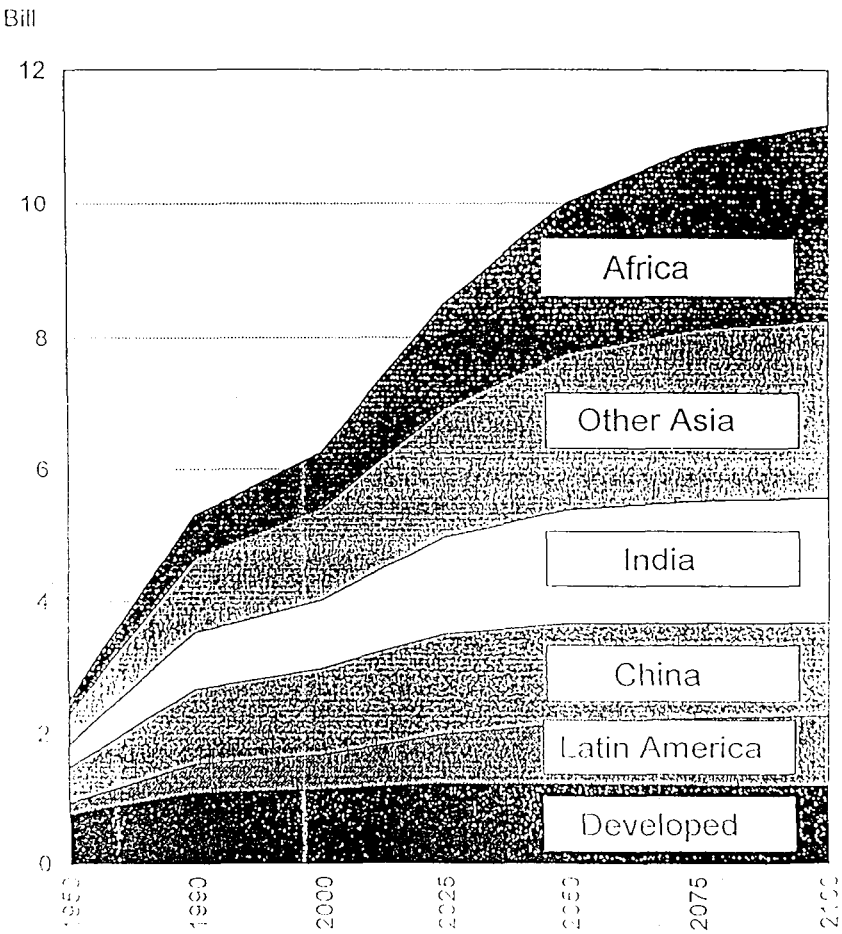
Figura 66



World Energy Use Increasing Faster Than Population¹

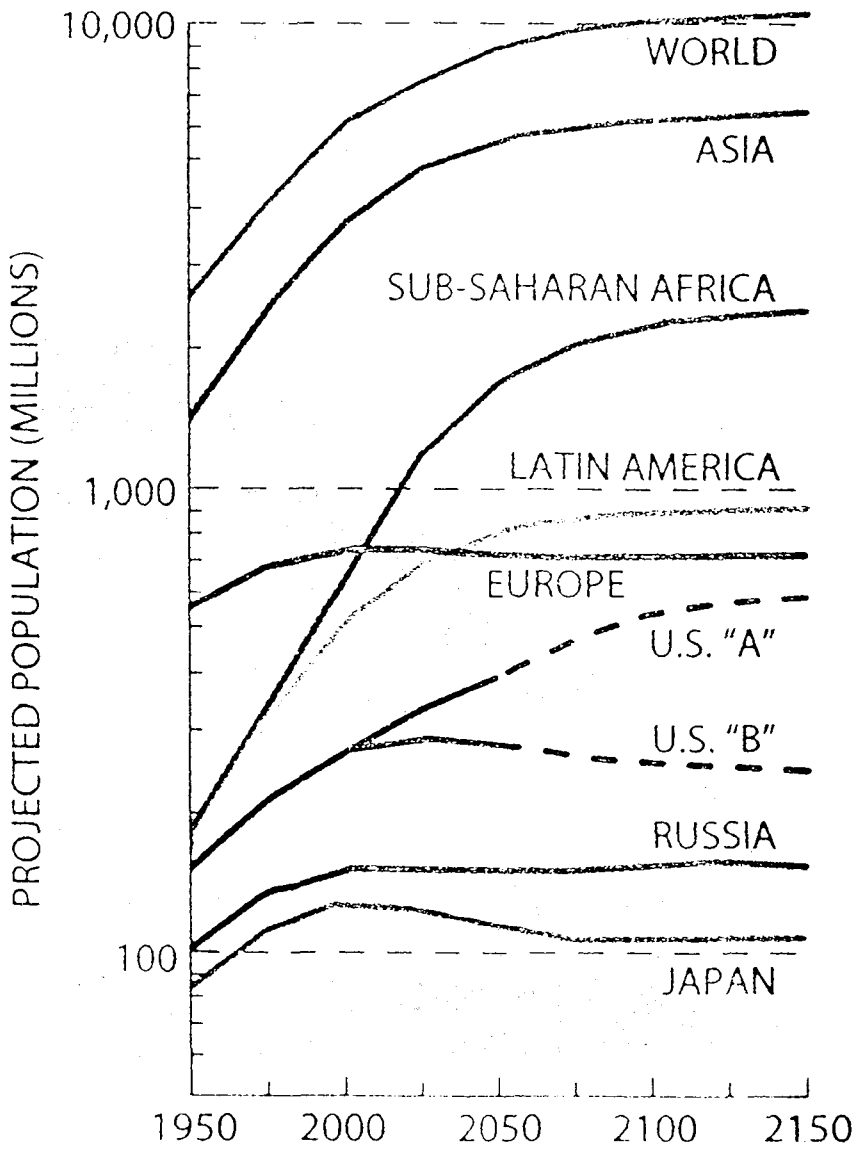
Figura 67

World Population:



World Energy Council, 1994

Figura 68



SOURCE: U.S. data are based on Census Bureau series projections through 2050. Data for all other areas are from Eduard Bos et al., *World Population Projections, 1994-95 Edition*. (Johns Hopkins University Press for the World Bank, 1994.)

de crecimiento, la distribución geográfica y la tendencia hacia un futuro más lejano. La primera realidad para apreciar su importancia es destacar, como se aprecia en la figura 66 que la demanda energética mundial aumenta más rápidamente que la población.

La población ha aumentado en los últimos 50 años tanto como desde el comienzo de la historia. Hemos pasado de los 2.500 millones de habitantes en 1950 a los cerca de 5.600 en la actualidad, como se aprecia en la tabla 42. ¿Seguirá así el crecimiento y dónde tendrá lugar preferentemente?.

El Congreso Mundial de la Energía ha predicho en 1994, véase la figura 67, que hasta el año 2100 tendrá lugar en África, en India, China, resto de Asia y en Iberoamérica, mientras que en los países desarrollados se mantendrá constante.

La tendencia hacia la estabilización en todas las zonas del mundo es evidente, tanto en la figura 67 como en la figura 68, tomada de un trabajo de 1997, en el que la población mundial alcanza en el año 2100 una cifra de 10.000 millones de personas, con sólo un leve asomo de aumento posterior. De ellos el 90% habitaría, salvo cambios drásticos en la sociedad, en los hoy llamados países en desarrollo o tercer mundo y sólo el 10% en los actuales países desarrollados.

POBLACION MUNDIAL

AÑO	MILLONES	ETAPA	
HACE 1 MILLON (?)	0,125	PALEOLITICO	
" 300.000	1	"	
" 25.000	3,3	"	
" 10.000	5,3	MESOLITICO	
" 6.000	86,5	ALDEAS Y PRIMERAS CIUDADES	
" 2.000	133	ALDEAS Y CIUDADES MERCADO	
AÑO	1650	545	AGRARIA E INDUSTRIAL
"	1800	906	"
"	1900	1.610	"
"	1950	2.516	GRANDES CIUDADES
"	1970	3.615	"
"	1990	5.457	"

Como ya se hizo notar, por razones de coste y de tecnología disponible hay un límite a la mejora de la eficiencia energética y, en consecuencia, de la intensidad energética de los países desarrollados por lo que no es previsible que la disminución ahora observable pueda seguir manteniéndose más allá del año 2020, según ha señalado la Agencia Internacional de la Energía. Por el contrario, en los países en desarrollo el proceso de mejora de la intensidad energética tendrá lugar mucho más lentamente y transcurrirá hasta un período muy posterior al año 2020.

Esto afortunadamente significa que en los países desarrollados habrá un aumento moderado o incluso estancamiento de la demanda a corto y medio plazo y bastante alta en el resto del mundo, excepto desgraciadamente en los países de la antigua Unión Soviética y en los países menos desarrollados. Las previsiones son máximas en las zonas asiática y del Pacífico cuyo crecimiento medio de 1960 a 1994 ha sido referido al PIB del 10% en China, el 8% en Japón, 6% en la India y el 9% en los restantes países asiáticos y las previstas para el período 1995-2010 serán del 7% en China, 3% en Japón, 6% para la India y 6% para los demás países asiáticos. Esto se traduce en que Asia en conjunto tendrá un incremento del consumo energético entre 1995 y 2015 del 3,5% frente a una media mundial del 2,2%.

Según esto la demanda energética de Asia en el año 2000 será superior en un 50% al de América del Norte y es muy probable que la demanda de los países en desarrollo suponga en el 2010 el 40% de la de todo el mundo.

En China y en la India el crecimiento de la demanda será atendido por su producción propia de carbón, pero continuará la dependencia general del petróleo tanto en estos países como en el resto de los asiáticos. Dado que Asia sólo tiene un 4,4% de las reservas mundiales de petróleo, valor que es sólo superior al de las reservas de Europa, el crecimiento de la demanda significará también que Asia se convertirá en el mejor cliente de los países productores del Oriente medio.

Las diferencias entre los países desarrollados y en desarrollo, aunque sea preciso a largo plazo lograr una igualación relativa, harán que a corto plazo las tendencias globales sean impuestas por el mayor consumidor, con las limitaciones tecnológicas debidas a consideraciones ambientales.

Así, el papel preponderante actual del petróleo podría disminuir algo, pero como las posibilidades de sustituirlo en los transportes son limitadas, seguirá manteniendo su posición esencial en el primer cuarto del siglo XXI. Análogamente, es muy probable que el consumo de carbón disminuya en cuanto a porcentaje de la demanda global, pero, a causa de su empleo para generar electricidad en países con grandes reservas, el consumo será constante e incluso aumentará. Constituirá un factor importante para ello el empleo de tecnologías limpias en los países desarrollados y que, además, no encarezcan los costes, en los países en desarrollo.

Aún suponiendo que las energías renovables (eólica, solar, biomasa, etc) tengan una tasa de crecimiento mayor que la actual, muy probablemente no desempeñarán un papel importante hasta el año 2020, pero, junto al aumento de la eficiencia energética, comenzarán a ser importantes en el abanico de tipos de energía empleados.

El gas natural continuará desplazando al carbón y a los productos petrolíferos del consumo doméstico, algo, aunque poco, del transporte sobre todo en las grandes ciudades, y en la producción de electricidad, para instalaciones de ciclo combinado, funcionando en base o en punta.

La energía nuclear se mantendrá constante o disminuirá en los países desarrollados, dependiendo de la opinión pública y de la política energética, pero crecerá en los países asiáticos, por lo cual de forma global es posible que su contribución se estabilice, salvo si se produce una nueva crisis energética, poco probable, o se demuestre la resolución práctica del almacenamiento de los residuos radiactivos.

La electricidad continuará aumentando su participación, en el consumo final. Las nuevas tecnologías de comunicación, del cálculo, de obtención y transmisión de imágenes, de diagnóstico médico, etc. están basadas en ella y los nuevos sistemas

ferroviarios de cercanías y de largas distancias, así como los transportes urbanos tienden también a su utilización.

En este período, hasta el año 2025, habrá una cierta incertidumbre en la selección de las energías a emplear por los diversos países. Las soluciones dependerán en cada caso. Se atenderá, no obstante, la demanda con una mezcla de energías atendiendo a los conocimientos tecnológicos, el ambiente y los costes de inversión y de operación. Sin embargo, las soluciones tendrán un carácter fundamentalmente político y sólo algunas limitaciones pueden ser sociales y ambientales como en el caso del carbón, de seguridad de suministro como en el gas natural y de aceptabilidad social como en la energía nuclear.

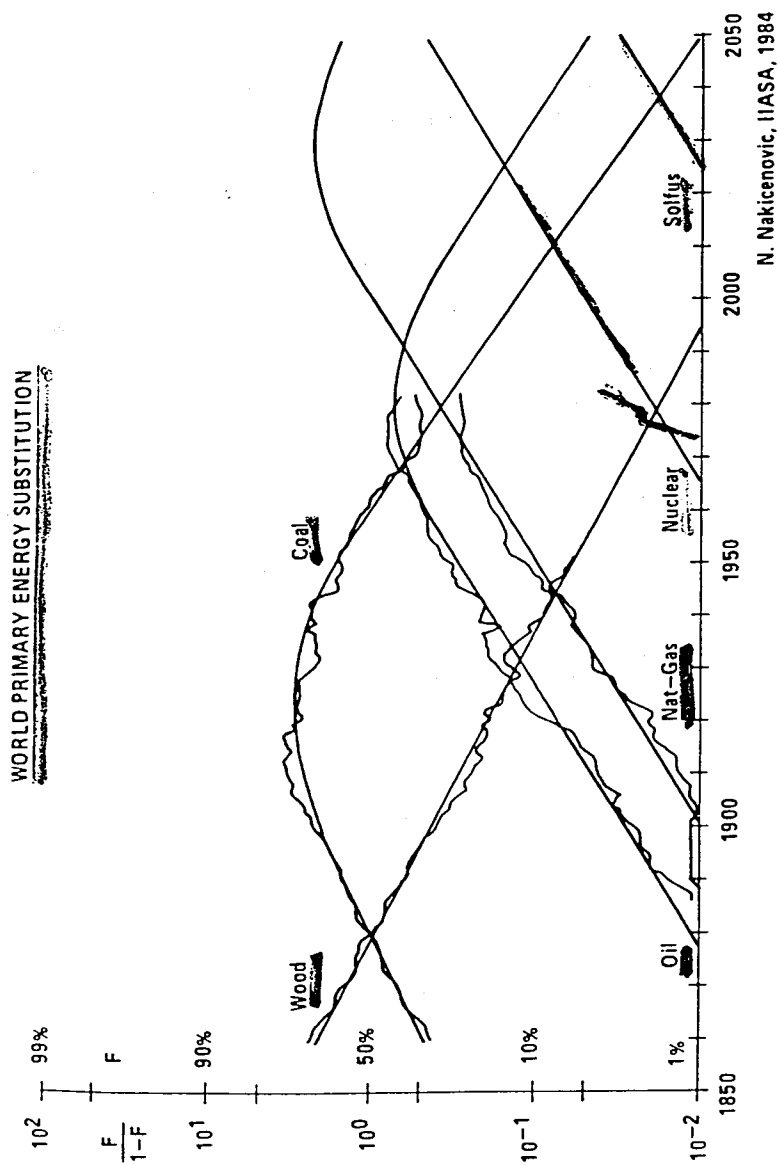
El papel de la tecnología puede ser importante, sobre todo si se asocia con unas condiciones favorables de financiación, para incrementar la producción de energía en los países en desarrollo, lo que incluye no sólo la generación, sino también su distribución y transporte, es decir, la creación de las infraestructuras y la formación del personal necesario.

Con precios relativamente estables y suministros asegurados, la opinión pública y los políticos que la representan drán cada vez más importancia a las consideraciones ambientales y como factores destacables del impacto de las fuentes energéticas considerarán su impacto sobre el efecto invernadero, la capa de ozono y las lluvias ácidas, y la resolución de los problemas de los residuos de la generación de energía y en especial de los residuos radiactivos.

Al final de este período, si durante él no hay hallazgos espectaculares de nuevos yacimientos, se comenzará ya a vislumbrar el período de agotamiento de las reservas comerciales asequibles a precios bajos de los crudos ligeros de petróleo y del gas natural. Comenzará entonces la búsqueda intensiva de sustitutos especialmente para los transportes y para la industria química. Este proceso ha sido ya iniciado, pero tímidamente porque faltan aún los grandes argumentos de la escasez y de los precios altos de la energía. Hemos asistido a la sustitución del carbón o de la madera para usos domésticos por el butano primeramente y ahora por el gas natural. En la generación de electricidad se sustituye el fuelóleo por el gas natural y los hornos industriales de muy distintos sectores emplean, incluso en la siderurgia, electricidad o gas natural. En el transporte, ya se ha ensayado el empleo de alcoholes, metanol y etanol, como sustitutivos de la gasolina y de los ésteres metílicos y etílicos de aceites vegetales en los motores Diesel.

El mecanismo de sustitución de combustibles según las épocas ha sido estudiado intensamente por instituciones y organizaciones como forma de previsión del futuro para estudios de mercado y para dirigir la investigación a las áreas más prometedoras. Uno de los estudios de evolución de los sistemas energéticos, presentado en la figura 69, se inspira en los ciclos de Kondratiev bien conocidos de los economistas, donde aparece la función $F/1-F$ en que F es la fracción de energía primaria contribuida por una forma dada de combustible. Puede comprobarse cómo el petróleo está a punto de alcanzar el máximo, cómo sigue aumentando el gas natural, cómo se inicia la energía nuclear y cómo finalmente el empleo de las energías solar y de fusión nuclear se iniciará el próximo siglo, aunque no tan temprano como se indica en el gráfico.

Figura 69



Con electricidad barata se puede resolver el problema del transporte mediante el empleo de Hidrógeno, una vez resuelto el problema de su almacenamiento y distribución, a partir de agua por electrolisis. El Hidrógeno así obtenido serviría asimismo para, en una primera fase, obtener hidrocarburos saturados o poco insaturados a partir de los crudos pesados, bitúmenes y pizarras o arenas bituminosas. En una fase bastante posterior el Hidrógeno podrá utilizarse para obtener del carbón mediante craqueo e hidrogenación catalítica productos análogos a los que hoy se producen a partir del petróleo. Habrá que tener en cuenta para ello que en los productos pesados del petróleo, tanto naturales como de refinería, y en el carbón se concentran los agentes más contaminantes como Azufre, metales pesados, etc.

Salvo mediante la utilización del Hidrógeno, los crudos pesados y sobre todo el carbón emiten más CO₂ que el gas natural o los crudos ligeros. Esta circunstancia, más el uso creciente del carbón en grandes extensiones de Asia y el continuado empleo de la biomasa y la madera en el tercer mundo, confirman la gran dificultad de controlar las emisiones de CO₂ y menos aún de reducirlas. En la conferencia de Río de Janeiro se adoptó el acuerdo de mantener las emisiones al nivel de 1990, lo que no se ha conseguido en los países desarrollados.

Si en el período 2025-2050 se reducen los consumos de petróleo y gas natural, al menos, en los países desarrollados, el aumento de las emisiones de CO₂ puede resultar espectacular a nivel global. Sólo el empleo de la biomasa, con nuevas plantaciones, de las energías renovables restantes y de la energía nuclear, que no emiten CO₂, puede mitigar el problema.

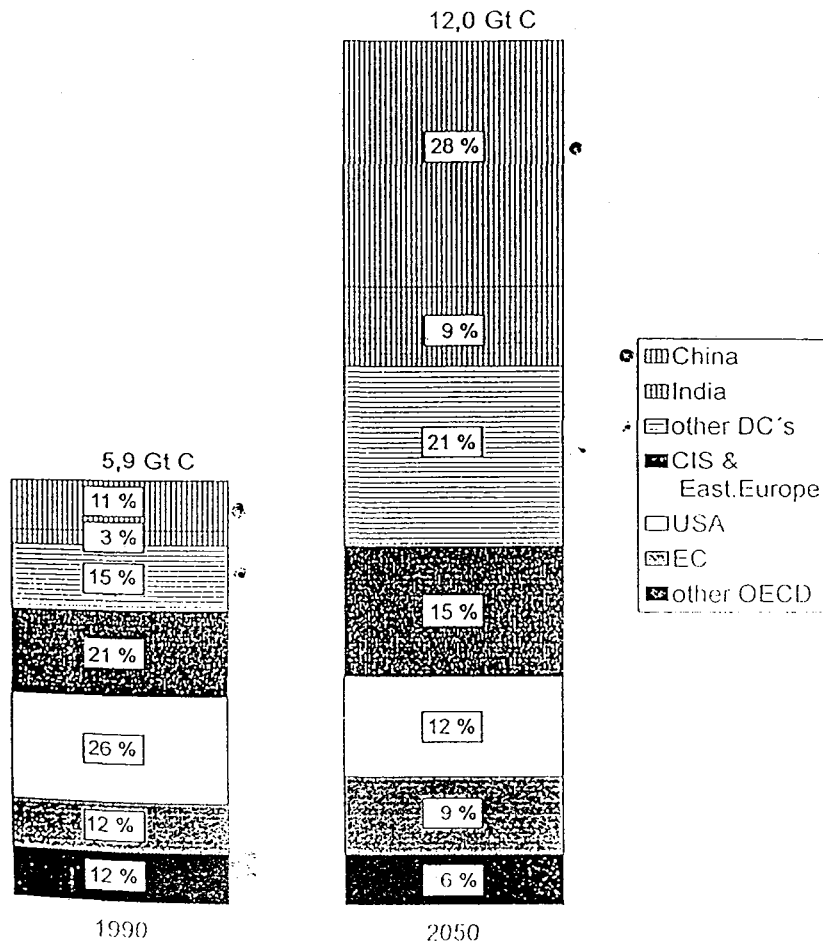
El cambio en las emisiones de CO₂, entre 1990 y 2050 está dado en la figura 70, según el Consejo Mundial de la Energía. Cuantitativamente, se pasa de las 5,9 Gt de Carbono contenido a 12, es decir, se duplica conforme a un escenario como el descrito, aumento del carbón, constancia de lo nuclear, disminución de petróleo y gas natural y aumento de las energías renovables. Los principales incrementos se deben cuantitativamente a China, India, otros países en desarrollo y los países de la antigua Unión Soviética. Puede observarse también que los países desarrollados en conjunto han aumentado sólo muy ligeramente las emisiones y su contribución al total que era en 1990 del 50% pasa a ser en el 2050 solamente el 27% inferior al 28% de China.

Sin embargo, el peso de estos tipos de energías, renovables y nuclear, no será suficiente para contrarrestar los efectos del carbón y el contenido en CO₂ de la atmósfera continuará aumentando. Para entonces se tendrá ya un mejor conocimiento de las relaciones con el cambio climático y con bastante probabilidad será preciso adoptar medidas drásticas para reducir las emisiones y quizá favorecer la absorción del CO₂ en las plantas de mares y Océanos.

Es esta una idea que está mereciendo cierta atención por parte de los oceanógrafos. Es bien conocido que la fijación del CO₂ por las plantas acuáticas y oceánicas está controlada por la luz y por los nutrientes disponibles entre ellos Fósforo y Nitrógeno y más modernamente se ha encontrado que también influyen Hierro y otros metales traza. En algunos casos la limitación de Hierro en ciertas zonas podría ser fácilmente resuelta y así podría conseguirse favorecer la fijación del Nitrógeno, que, en períodos largos de tiempo, parece ser el factor limitante de la fijación del CO₂.

Figura 70

Global CO2-Emissions:



World Energy Council, 1994

Muchas otras formas de hacer que el CO₂ de la combustión de materia orgánica de cualquier otro tipo no se incorpore a la atmósfera se basan en la utilización del CO₂ para rejuvenecer yacimientos petrolíferos o para cultivos de invernadero. Una propuesta que raya con la ciencia ficción para el caso de una grave situación climática será enviarlo en forma líquida al fondo de los Océanos.

No parece necesario aclarar que la contribución nuclear en este período estará basada en reactores de fisión, ya que la fusión no será comercial antes de la segunda mitad del siglo XXI y quizá solamente lo currirá en el siglo XXII. Teniendo en cuenta que los actuales reactores concluirán su vida útil entre los años 2015 y 2035, con gran probabilidad muchos de ellos en los países desarrollados serán clausurados o se sustituirán los componentes más importantes, mientras que en Asia y en el resto de los países que ahora instalan reactores avanzados estos continuarán funcionando en el 2050.

En resumen, desde el punto de vista de las reservas y el consumo y sin consideraciones sobre el ambiente, la economía, la opinión pública y la política, el petróleo y el gas natural tienen a escala global solamente una vida que no llega a los 200 años, mientras que el carbón y la energía nuclear de fisión pueden atender las necesidades del mundo para muchos siglos, que en el caso del carbón pueden extenderse lo mismo que los reactores reproductores a algunos, pocos, milenios.

Únicamente la fusión nuclear y la energía solar, térmica y fotoeléctrica, pueden ser consideradas como quasi-inagotables y servir a la Humanidad durante toda la vida del planeta.

Las energías hidráulica y de la biomasa, la eólica, la geotérmica y todas las demás renovables, a pesar en unos casos de la intermitencia y en otros del clima, pueden tener utilización que complementará la obtenible por las fuentes clásicas.

La dificultad de pensar en términos de plazos más altos de tiempo, más allá de los siglos XXI y XXII, es evidente y además es presuntuosa. Basta tener en cuenta que la sociedad tarda unos 50 años en incorporar cambios tecnológicos importantes en sistemas como el energético o el transporte, 100 años o más en modificar sus valores culturales y muchos siglos en reconciliar diferencias religiosas o étnicas.

Se ha visto ya cómo se ha duplicado la población del mundo en los últimos 50 años. Igualmente la producción global en términos económicos se duplica en unos 30 años. Es indudable que ambos hechos repercuten en una gran demanda de recursos naturales y en un gran impacto ambiental. Por otra parte, en este siglo cada 20 años han aparecido nuevas tecnologías que alteran la naturaleza de los bienes y servicios que emplea la sociedad.

Todo ello ha producido desajustes entre los logros prácticos conseguidos por los avances de la Ciencia y la Tecnología y las ideas y cultura de la sociedad, cuyas consecuencias más visibles han sido destacadas y puestas de manifiesto por muchos de los movimientos y organizaciones ambientalistas, que se llaman a sí mismas ecologistas.

Desde la llamada primera del Club de Roma y de manera que ha encontrado acogida en los medios de comunicación se han cuestionado los costes del crecimiento puramente económico y las arriesgadas, si no peligrosas, implicaciones del futuro. Han surgido más o menos espontáneamente dudas sobre la habitabilidad de la Tierra, sobre su resistencia y la de los ecosistemas a las presiones de la población, sobre las diferencias sociales y entre países y la atención a sus necesidades de alimentos, agua y energía y sobre la calidad de vida de la Humanidad como resultante de todas estas fuerzas contradictorias.

La respuesta del público ha sido de temor. No se han tenido en cuenta las contribuciones de la Ciencia y la Tecnología al actual nivel de bienestar, ni a la accesibilidad de muchos de los recursos que hoy disfrutamos.

En este sentido conviene recordar que nuestra forma de vida no hubiera sido previsible a finales del siglo pasado y que gracias a la Ciencia y la Tecnología obtenemos gran parte de la satisfacción de nuestras necesidades.

Junto a las preocupaciones respecto al futuro, la conservación de los ecosistemas plantea una cuestión filosófica importante cual es la de la conservación de todas las especies y el tratamiento por igual de todos los seres vivos, de los cuales la Humanidad no es sino uno más. Esta idea, contraria a todo el ideario judeocristiano, ha sido aceptada por muchos sin discusión. No es este ni el momento ni la ocasión para ello, ya que en toda esta exposición se ha seguido un criterio antropocéntrico.

Otra de las ideas aceptadas ha sido la del crecimiento sostenible o sostenibilidad, basada implícitamente en la separación entre Humanidad y Naturaleza, y que puede definirse económicamente como el consumo de los dividendos de la Naturaleza sin dañar su capital.

Este ideal es inaccesible porque, sin personas, los dividendos de la Naturaleza se invierten totalmente en mantener el capital.

Obviamente la actividad humana afecta tanto a los dividendos como al capital de la Naturaleza y crece con el aumento de la población. Y aunque fuera posible mantener constantes dividendos y capital, habría que distribuir con una suma igual a cero la utilización de los recursos naturales entre los continentes, regiones o países del globo para satisfacer sus necesidades.

Pueden imaginarse otros criterios de desarrollo sostenible, como son el de hacer mínima la progresiva degradación ambiental o la de preservar los recursos existentes para las generaciones futuras.

Todos los criterios comparten argumentos sencillos, fáciles de entender, difícilmente rebatibles, pero de conclusiones incompletas. Se dice, que los recursos de la Tierra son limitados y se consumen a ritmo creciente como resultado del aumento de la población y del desarrollo económico. Si continúa este crecimiento, si no se modifica, destruirá una simbiosis entre la Humanidad y la Naturaleza como la que ha existido hasta ahora. Y se concluye, la conjunción del aumento de la población y del agotamiento de los recursos conducirá a una situación catastrófica.

Esta lógica se continúa con la idea de que deben adoptarse medidas enérgicas e inmediatas para atajar esta situación y que tenemos todos una responsabilidad ética de asegurar la continuación de la vida en el planeta.

No se tienen en cuenta ni las predicciones de futura estabilización de la población, ni de los recursos que habrá disponibles para las futuras generaciones, ni de las necesidades en las épocas pasadas y cómo la Tecnología actual tiene ya un potencial de conservación y restauración de la flora y la fauna. Se ignora el papel del mercado y se postula un centralismo poderoso que adopte decisiones. Y se ignora el papel del cerebro humano, motor del desarrollo y proveedor de soluciones a lo largo de la historia.

No obstante, el público ha acogido estas ideas creyendo que las propuestas para una solución serán demasiado tardías y, como hay también ideas encontradas entre los estudiosos, el debate sobre éste y otros extremos probablemente seguirá.

Sea cual fuere el concepto de crecimiento sostenible que se piense es más correcto, el propio concepto destaca el uso más eficiente posible de los recursos mediante el conocimiento y la investigación.

La mayor parte de las hipotéticas y urgentes soluciones al gravísimo problema, según los pesimistas, de la futura devastación global del planeta han alcanzado gran notoriedad. Conviene, sin embargo, reflexionar sobre ello a base de hechos o experiencias pasadas. La sociedad reacciona frente a las amenazas con una combinación de acciones para reducir sus probabilidades de ocurrir y mitigar su gravedad. Cuando estas acciones son prematuras o equivocadas es cuando realmente las amenazas se convierten en catástrofes. Ejemplos característicos son la muralla china y la línea Maginot francesa. La realidad va más deprisa que las acciones. La Tecnología da soluciones que las acciones no han previsto. En todo caso este es un problema ejemplar de toma de decisiones con bases inciertas sobre el que las Matemáticas tienen mucho que decir.

Pero si hemos de considerar un período tan largo como 100 ó 200 años, habremos de huir de basarnos en los conocimientos de 1997. Con ocasión de la Exposición Mundial de Chicago de 1893 se hizo una encuesta entre grandes pensadores para predecir lo que ocurriría hasta 1993. Excepto por unas pocas predicciones, tales como el crecimiento de las ciudades y del sistema telefónico, todo lo que diferencia 1993 de 1893 no fue predicho.

Se ha visto ya que entra dentro de lo probable que la población del mundo comience a estabilizarse en el año 2100 en unos 10.000 millones. Si se considera una reducción de la fertilidad debida al crecimiento económico especialmente en los países menos desarrollados, podremos esperar que en el año 2200 no se superen los 15.000 millones de habitantes, a los que habrá de satisfacer en sus necesidades básicas que desprenden esencialmente de los alimentos, agua y energía y en último término solamente del agua y de la energía.

Las necesidades de agua se pueden atender fácilmente durante muchos años con las posibilidades actuales y ello a pesar del despilfarro que suponen muchos usos agrícolas e industriales. En todo caso, los Océanos constituyen una fuente abundante y ya en zonas costeras la desalación compite con algunas fuentes normales de suministro. Con energía barata el problema del agua puede desaparecer, así como muchos otros problemas agrícolas, de alimentación y de bienestar y calidad de vida en los países en desarrollo.

Al final, muchos de los problemas futuros desembocan en la consecución de un suministro adecuado de energía.

Como hemos visto anteriormente, el aumento de nivel de vida y de su consecuencia, el consumo de energía, estaría determinado en el futuro por los países que hoy son considerados como menos desarrollados.

Una hipótesis y un cálculo somero nos permite imaginar la significación de la demanda de energía en el año 2200. La hipótesis es que en ese año la media mundial de consumo alcance 5 veces el valor actual para tener en cuenta el aumento de los países en desarrollo que pasarían a tener entonces un consumo energético per capita igual a la media mundial actual. Esto equivale a un modesto crecimiento del 1,4% anual, que parece asequible sin grandes complicaciones.

Si la población pasa a 15.000 millones, es decir, se multiplica por 3 respecto a la actual y el consumo per cápita por 5, la producción de energía deberá multiplicarse por 15 ó, si por avances tecnológicos en todas las actividades humanas se duplica la eficacia en el uso de la energía, el resultado neto es de 7,5 veces la generación actual (8.000 millones de tep anuales) o sea, unos 60.000 millones de toneladas equivalentes de petróleo al año.

Puede admitirse que para ese año 2200 las energías renovables hayan sido desarrolladas en una gran extensión. La energía hidroeléctrica y la biomasa podrían contribuir con un 20% de la demanda, esto es, 12.000 millones de tep anuales, vez y media la producción actual.

Otro 20% podría ser obtenido por medio de las energías renovables intermitentes, solar y eólica, aunque para entonces no se haya resuelto el almacenamiento de la energía.

El restante 60% deberá ser proporcionado por el carbón y la energía nuclear. La aportación del carbón dependerá de consideraciones ambientales y ello puede dar lugar a que la única fuente disponible sea la energía nuclear, de fisión o fusión, si ésta está disponible comercialmente para entonces. Es de esperar que la experiencia obtenida en todo tipo de reactores nucleares y la ausencia de accidentes graves como el de Chernóbil habrá disipado los temores actuales.

Durante los 200 que quedan hasta entonces obviamente pueden aparecer avances espectaculares e incluso descubrimientos que afecten a cualquier predicción. Algunos de ellos pueden ser extrapolaciones de técnicas actuales, tales como empleo de las rocas calientes del manto terrestre, de espejos en el espacio exterior enfocados hacia colectores en la superficie de la Tierra o de celdas fotovoltaicas y envío de la electricidad a la Tierra mediante ondas. Un método de almacenamiento de la energía superior a los medios limitados de hoy o la consecución de la superconducción práctica pueden dar un carácter predominante a la energía solar fotovoltaica.

No obstante, tales especulaciones no deben ser empleadas responsablemente. No se puede esperar, por ejemplo, un descubrimiento de un nuevo tipo de energía primaria. En los últimos 1.000 años no se ha encontrado más fuente nueva que la energía nuclear. La combustión, la energía hidráulica, la eólica, las mareas, eran ya conocidas.

Como también se ha señalado anteriormente, la electricidad seguirá aumentando y en ese sentido la parte de energía primaria dedicada a la generación de electricidad se continuará incrementando. Del 30% de la energía primaria actual podrá pasarse ya en el siglo XXI al 50%.

Las nuevas tecnologías se basan en gran parte en la electricidad. Ya hemos citado las de la comunicación, ordenadores y televisión, pero otras tales como la desalación de agua de mar, el reciclado y reproceso de materiales de desecho y el transporte no contaminante son ya evidentes hacia el futuro.

El escenario presentado acentúa el hecho de que todas las formas y fuentes de energía deben ser utilizadas desde ahora hasta dentro de 200 años. Durante ese tiempo el reto de la sociedad es atender la demanda de energía teniendo en cuenta las limitaciones que imponen la seguridad, la salud, el ambiente, la economía y la política.

Para resumir finalmente mis pensamientos sobre el futuro de la energía, quería indicar que:

1. A escala mundial los recursos energéticos son suficientes para no constituir una barrera a un mundo habitable y sostenible, lo que también puede extenderse a otros recursos naturales.
2. La tecnología actual puede resolver ya las dificultades que puedan surgir desde el punto de vista de la seguridad y del ambiente en la producción de la energía necesaria.
3. La Ciencia y la Tecnología pueden hacer frente a los retos del aumento de la población mundial y al necesario aumento del nivel de vida de los países del tercer mundo. Los obstáculos para ello son de otra naturaleza.

4. Las generaciones futuras, con sus necesidades primarias cubiertas mejor que ahora, y con mayores y mejores conocimientos de las soluciones técnicas posibles podrán hacer frente, como hasta ahora ha ocurrido, a la obtención de la energía necesaria para continuar la mejora continua de su búsqueda de la felicidad.
5. La fe en la educación y en la investigación y la confianza en la persona humana dan origen al optimismo con que hay que afrontar el futuro.

He dicho.