

Capítulo 19

Recursos energéticos y contaminación

Recursos energéticos

Se presenta aquí una descripción de la problemática de los recursos energéticos, particularmente en lo que concierne a su conversión, almacenamiento, utilización y efectos residuales. Aunque esta problemática es más general (aplicable p.e. a los recursos minerales o a los recursos alimenticios), se trata aquí aplicada a la ingeniería energética y sobre todo en relación con las máquinas térmicas de producción de potencia por combustión, pues ellas son las consumidoras de la mayor proporción de los recursos energéticos primarios y las mayores productoras de residuos contaminantes.

Ya se sabe que la energía es una propiedad escalar aditiva de un sistema, asociada a la homogeneidad de la variable tiempo y dependiente de las posiciones y velocidades de las partículas microscópicas que lo integran, tal que en las evoluciones aisladas permanece constante, y al transvasarse de un sistema cerrado a otro se manifiesta en forma de trabajo y de calor. Las transformaciones energéticas de mayor interés en la utilización de recursos energéticos y en la generación de contaminantes van asociadas a transformaciones químicas de la materia, particularmente al proceso de combustión de materia fósil (carbón, petróleo y gas) con aire atmosférico.

En este capítulo aparecen tantos datos (muchos de ellos todavía controvertidos), que en lugar de citar su procedencia detallada, se remite al lector a dos grandes resúmenes recientes: "World Resources 1990-91", World Resources Institute, Oxford Univ. Press, 1990, y "La energía que la Tierra necesita", número monográfico de *Investigación y Ciencia* de Nov. 1990.

El balance energético de la biosfera (esa delgada capa esférica en la superficie terrestre de unos 10 km de espesor entre altura y profundidad), considerando que su masa no varía (pese al ligero escape de gas en la alta atmósfera), y que su temperatura media anual permanece constante ($\approx 15^\circ\text{C}$), será:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (19.1)$$

donde basta considerar las variaciones de energía interna debidas a las reacciones químicas (energía fósil, incluyendo la fotosíntesis) y nucleares, es decir:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{f\acute{o}sil} + \dot{E}_{nuclear} \quad \text{con} \quad \dot{E}_{f\acute{o}sil} \approx -10 \cdot 10^{12} \text{ W}, \quad \dot{E}_{nuclear} \approx -0,5 \cdot 10^{12} \text{ W} \quad (19.2)$$

siendo ambos términos negativos porque el consumo de energía fósil por combustión es muy superior a la generación de energía fósil por fotosíntesis, y por no haber creación de energía nuclear. Hay que tener presente que de los valores anteriores sólo la explotación de combustible fósil y nuclear está mayoritariamente aprovechada por el hombre.

Los flujos de calor de la biosfera con el resto del universo son el recibido del interior de la Tierra (geotérmico) y el balance de radiaciones térmicas con el espacio exterior, que se puede poner así:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{Q}_{geot\acute{e}rmico} + \dot{Q}_{absorción\ solar} - \dot{Q}_{emisión\ infrarroja} \\ \text{con } \dot{Q}_{geot\acute{e}rmico} &\approx 30 \cdot 10^{12} \text{ W}, \quad \dot{Q}_{absorción\ solar} \approx -\dot{Q}_{emisión\ infrarroja} \approx 120\,000 \cdot 10^{12} \text{ W} \end{aligned} \quad (19.3)$$

donde la absorción es un 70% de la radiación solar incidente en la estratosfera (que es de $1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). De esta absorción un 30% pasa al ciclo hidrológico (evaporación), un 0,3% al ciclo eólico (vientos), un 0,2% al ciclo biológico (fotosíntesis) y el resto a energía térmica.

El único flujo de trabajo a considerar es el debido al efecto de la atracción gravitatoria lunar y su movimiento relativo a la Tierra, que da lugar a las mareas, y cuyo valor es:

$$\dot{W} = \dot{W}_{bombeo\ gravitacional} \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ W} \quad (19.4)$$

El hombre viene aprovechando los recursos energéticos naturales para calentarse, alimentarse, ver, desplazarse y transformar el mundo que le rodea. Pero, tal como ocurre con los alimentos, no siempre la Naturaleza proporciona la cantidad y tipo de energía deseados en el lugar e instante en que se quisiera, por lo que debe establecerse la consabida cadena de los bienes económicos: producción, transformación (si fuera necesario), almacenamiento en origen, transporte (distribución), almacenamiento en destino (que suele ser también necesario aquí) y consumo (y eliminación de residuos), donde también suele haber una etapa intermedia de almacenamiento.

A esta problemática logística se suma el hecho de que la tecnología actual permite manejar con mayor facilidad unos tipos de energía que otros. Por ejemplo, es más sencillo construir una central nuclear (lo cual ya dura unos diez años), excavar el uranio, enriquecerlo, generar electricidad, enterrar los residuos radiactivos, transportar la electricidad a cientos de kilómetros y distribuirla para el consumo doméstico, que utilizar directamente esa misma cantidad de energía solar; así, pese a que con el primer sistema cuesta unas 0,3 MPta generar 1 kW durante 20 años y con el solar sería gratis, cuando se suma el coste de instalación del sistema nuclear (unas 0,05 MPta/kW instalado) y solar (unas 0,5 MPta/kW instalado) se ve que, hoy por hoy, las centrales solares no pueden competir con las nucleares (por supuesto que si se consideran otras condiciones, políticas o de tamaño, la comparación puede variar mucho). También la Naturaleza parece muy selectiva en la utilización de sus recursos energéticos (la energía solar media que recibe el cuerpo humano bastaría para satisfacer las

necesidades energéticas metabólicas, si bien el consumo de alimentos permite además el crecimiento).

El rendimiento energético en la síntesis natural de materia viva (proceso de fotosíntesis: $H_2O + CO_2 + nh\nu = (1/2)O_2 + HCOOH$) es también muy bajo, del orden del 0,2%, aunque en cultivo artificial se ha llegado hasta un 4%. Una estimación de órdenes de magnitud enseña que el actual problema de la escasez de alimento en buena parte del mundo, podría paliarse con una distribución más equitativa, pues la producción mundial¹ supera las necesidades metabólicas básicas de la humanidad (≈ 100 W per cápita). Nótese que el consumo mundial de alimento está basado totalmente en materia renovable.

Por el contrario, el consumo actual de recursos energéticos se basa mayoritariamente en la combustión de materia fósil (carbón, petróleo y gas), finita, y prácticamente no renovable, por lo que es sólo cuestión de tiempo su agotamiento (y para el petróleo de pozo se estima que ese tiempo es de 30 a 50 años solamente). Aparte de la opción nuclear (fisión y fusión) que, aunque también es finita y no renovable, es muy grande, quedan las opciones renovables, todas ellas basadas en el aprovechamiento directo o indirecto de la energía solar. Pero hay que analizar con cuidado los rendimientos, pues p.e. todavía hay dudas de si las células fotovoltaicas de conversión directa de la energía solar en electricidad son capaces de generar durante toda su vida útil tanta energía como la necesaria para su fabricación y reciclaje.

Una solución futura podría ser el aprovechamiento energético de la biomasa, es decir, la producción fotosintética para consumo energético y no alimenticio. Supuesto que los avances en ingeniería genética consiguiesen elevar el rendimiento fotosintético del 0,2% actual a un 10% (ya se ha dicho que en laboratorio se llega hoy al 4%), bastaría dedicar un 5% de la tierra actualmente cultivada para satisfacer todas las necesidades energéticas actuales.

Las características de los recursos energéticos naturales son:

- Estado temporal: estáticos (almacenados, p.e. combustibles) o dinámicos (fluyentes, p.e. energía solar).
- Concentración, que para los estáticos se mide en J/kg o J/m^3 (casi todas pueden llegar a alcanzar unos 10^7 J/kg, excepto la nuclear que da mucho más y la térmica que da mucho menos) y para los dinámicos se mide en W/m^2 . Por ejemplo, un coche con un depósito de 40 litros, si fuese con uranio tendría para dar la vuelta al mundo (suponiendo que se pudieran construir motores nucleares tan pequeños); con gasolina tendría para unos 500 km (consumiendo unos $600 m^3$ de aire); con baterías eléctricas de plomo tendría para unos 15 km; si en el depósito hubiese vapor sobrecalentado tendría para unos 5 km; con un resorte tendría para unos 200 m, y si hubiese agua y se dejase caer 1 m, apenas lograría moverse.
- Convertibilidad en la forma de energía deseada (facilidad de la conversión y rendimiento). Por ejemplo, la conversión de la energía química del carbón (en

1. Aproximadamente, un 0,5% de la materia fotosintetizada es usada, directa o indirectamente, para la alimentación humana.

presencia de un oxidante) en energía eléctrica por los métodos tradicionales requiere máquinas grandes, ruidosas, sucias, contaminantes, etc., pero es muy fácil; sin embargo, realizar la misma conversión limpiamente por medio de una pila de combustible no tiene más inconveniente que el de la difícil tecnología requerida (todavía no comercializada). El 90% de los recursos energéticos explotados actualmente en el mundo son combustibles fósiles, formados hace millones de años; en la Tabla 19.1 se detalla el desglose de este consumo de energías primarias. Es interesante notar que en la utilización de recursos energéticos aparecen grandes ciclos históricos (Fig. 19.1): la madera (explotada desde la más remota antigüedad, pero centrado hacia 1800), el carbón (explotado desde el siglo XII, pero centrado hacia 1900), el petróleo (hacia 1970) y tal vez el gas natural (¿hacia el 2020?).

Tabla 19.1. Producción y consumo energético mundial en 1990.

Producción total = $3,5 \cdot 10^{20}$ J		Consumo total = $3,5 \cdot 10^{20}$ J		Producción eléctrica = $0,4 \cdot 10^{20}$ J	
-petróleo	35%	-servicios	35%	-carbón	39%
-carbón	28%	-industria	30%	-hidroeléctrica	18%
-gas natural	19%	-transporte	25%	-nuclear	17%
-hidroeléctrica	7%	-uso no energético	10%	-gas natural	15%
-biomasa ²	6%	(p.e. plásticos)		-petróleo	10%
-nuclear	5%			-solar, biomasa	1%

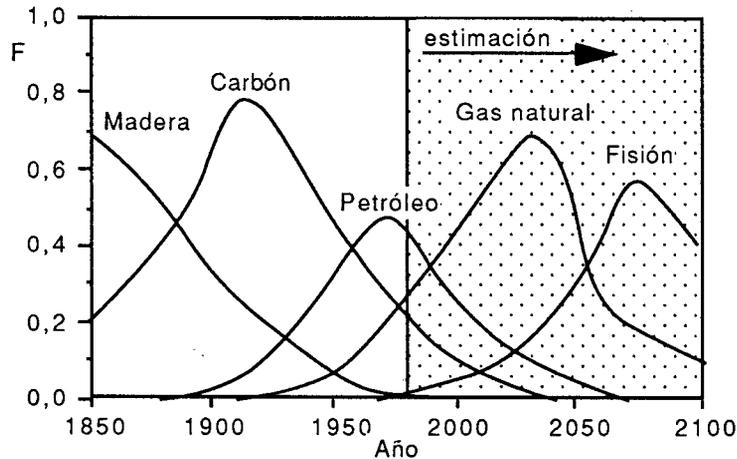


Fig. 19.1. Ciclos históricos en la utilización de recursos energéticos. F es la fracción del consumo suministrada por cada fuente.

- Precio. El precio de la energía está muy condicionado por la intervención estatal, ya que la energía (como el agua y las comunicaciones) es considerada como necesidad primaria de gran infraestructura y, a diferencia de los alimentos, se le cobra el mismo precio al usuario a pie de planta que al lejano. Aunque a veces se dice que el consumo de recursos primarios es rígido (no varía con el precio) y progresivo (siempre aumenta con el tiempo), en la Fig. 19.2 se pueden apreciar claramente las dos recesiones en el consumo mundial de energía, causados por las crisis del petróleo de 1973 y 1979.

2. Esta producción por biomasa corresponde a la leña y desechos agrícolas y ganaderos usados para calefacción y cocina en zonas subdesarrolladas del planeta, y no se contabiliza como producción comercial.

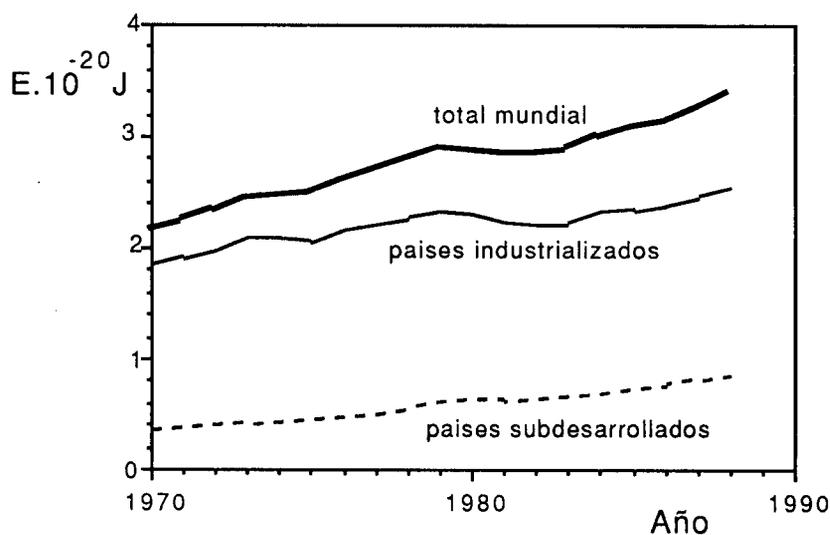


Fig. 19.2. Evolución del consumo mundial de energía primaria.

Como ejemplo de precios al consumo se pueden citar (valores de 1988): 3,5 Pta/MJ la electricidad de baja tensión (12 Pta/kWh, más 200 Pta/(kW.mes) por disponibilidad), 1,2 Pta/MJ el gas canalizado (5 Pta/termia, más 4000 Pta/año por disponibilidad³), 17 Pta/kg el fuelóleo, 55 Pta/kg el gasóleo, 80 Pta/litro la gasolina, 700 Pta/botella de 12,5 kg de butano y 20 \$/barril el crudo en origen. Respecto a los precios de coste, la Fig. 19.3 da una idea para el caso de plantas de producción térmica de electricidad.

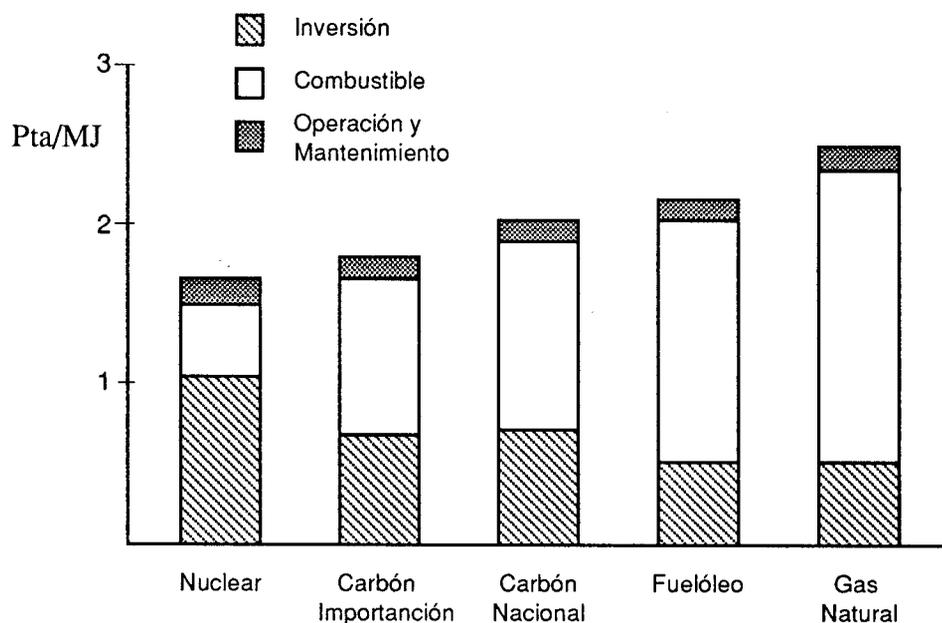


Fig. 19.3. Coste de generación de energía eléctrica en España para una central tipo. (En condiciones económicas de 1988 y 6000 horas de operación anual). ("El Libro de la energía", Forum Atómico Español, 1990).

3. 1 termia $\equiv 10^6$ cal $\equiv 4,184$ MJ. Otras unidades de uso vulgar son: 1 tec (tonelada equivalente de carbón) = 29500 MJ, 1 tep (tonelada equivalente de petróleo) = 42000 MJ, 1 bpc (barril de petróleo crudo) = 6120 MJ, 1 quad = $3,3 \cdot 10^{25}$ J.

Utilización de la energía

Sólo se trata aquí de la utilización ingenieril de la energía (y no del aprovechamiento natural como p.e. en acondicionamiento ambiental pasivo, crecimiento de las cosechas, etc). En 1991, el consumo mundial medio fue algo más de 10^{13} W (el flujo solar es de 10^{17} W y el captado por fotosíntesis de 10^{14} W), y sólo se aprovecha un 45%. Hasta la crisis energética de 1973 existía una proporcionalidad entre la renta per cápita y el consumo energético per cápita (del orden de 30 MJ/\$), aunque desde entonces el crecimiento del consumo energético ha sido algo menor; para España estos valores, en 1987, eran de 10^5 MJ/año per cápita y $4 \cdot 10^3$ \$/año per cápita. El consumo medio mundial per cápita fue de 2 kW, pero con una gran desproporción en su distribución: 11 kW en EE.UU., 5 kW en la CE⁴ y Japón, y 0,3 kW en el Tercer Mundo. Relacionado con esta heterogénea distribución del consumo energético (al menos en lo que a calefacción y aire acondicionado se refiere) está el hecho de que la superficie de vivienda privada en m² per cápita es de 60 en EE.UU., 30 en la CE, 15 en la URSS, y 7,5 en China.

En la Tabla 19.1 también se ha desglosado el consumo mundial por sectores. Es importante destacar que el consumo energético medio (en España unos 3500 W per cápita) es mucho mayor que la energía transformada en el metabolismo humano (unos 100 W), lo que da una idea clara del grado de dependencia tecnológica de las sociedades desarrolladas, y de la necesidad de aprovechar el trabajo del hombre como controlador y ordenador del trabajo de las máquinas que, aunque mucho mayor, es menos "inteligente"; media tonelada de carbón quemada en un motor térmico convencional, ya da más energía mecánica (trabajo) que una persona normal en toda su vida.

De los $4,1 \cdot 10^{18}$ J de recursos energéticos consumidos en España en 1987 (a razón de 130 GW), un 50% correspondió a petróleo (va bajando), un 5% a gas natural (va subiendo), un 30% a carbón (va subiendo), un 9% a nuclear, y un 6% a hidroeléctrica. De esa energía, un 30% se usa para generar electricidad (con rendimiento energético de 0,35), otro 30% se usa para mover vehículos (con rendimiento energético de 0,25), otro 30% se usa como combustible industrial (con rendimiento energético de 0,80) y el 10% restante como combustible doméstico (con rendimiento energético de 0,60).

La logística del acoplamiento temporal de la oferta (producción) y la demanda (consumo) es complicada debido a las fluctuaciones diarias (día/noche $\pm 25\%$), semanales (días laborables/días festivos $\pm 25\%$), anuales (invierno/verano $\pm 50\%$), etc.

En la problemática de la producción intervienen no sólo los costes de explotación sino los de instalación, tiempo de puesta en marcha, fiabilidad, contaminación, etc. La presión social sobre el impacto ambiental (emisión de contaminantes, lluvia ácida, efecto invernadero, residuos radiactivos y seguridad) hace aumentar los costes de instalación y explotación de los equipos. Los recursos energéticos estáticos (combustibles) son almacenables, pero (de momento) la energía eléctrica o mecánica no lo son (salvo en los embalses), y como el consumo varía tanto, la producción debe seguir la curva de carga (cobertura de la demanda), para lo cual se varía la producción de la central o, lo más práctico, se van enganchando y

4. CE=Comunidad Europea de los 12.

desenganchando centrales de la red. Se llama curva de carga de una red eléctrica a la curva de % de carga en función de % de tiempo en uso (Fig. 19.4). La carga base se cubre con energía nuclear (ya que si no se utiliza esta energía se pierde al ser el coste eminentemente de amortización) y la energía hidroeléctrica (ya que aunque ésta sí es almacenable para períodos cortos y, por tanto, puede usarse para cubrir picos, a largo plazo no es acumulable y además no conviene hacer funcionar las turbinas a cargas parciales sino en su potencia nominal). La zona media se cubre con centrales de carbón, y las puntas con turbinas de gas y grupos diesel. Conviene interconectar las redes, pues las fluctuaciones disminuyen con el tamaño.

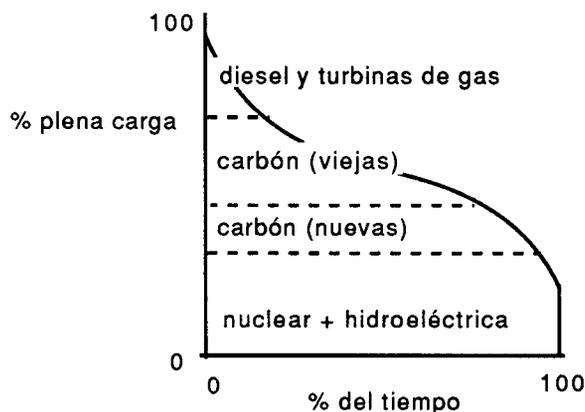


Fig. 19.4. Curva de carga típica de una red eléctrica y tipo de centrales más adecuadas.

Por este efecto del factor de carga se comprende la conveniencia (aunque pueda parecer insensato) de usar energía eléctrica para bombear agua a una presa alta por la noche para pasarla por la turbina al día siguiente ("turbinarla", como se suele decir) con un rendimiento energético global del 60% al 70%, si se tiene en cuenta que la electricidad nocturna, que es la que se usa, cuesta la mitad de lo que se obtiene por la electricidad diurna.

Como es obvio, resultaría muy ventajoso transvasar energía térmica del día a la noche y del verano al invierno. En la tierra, la atmósfera y el mar ayudan mucho, reduciendo a unos 20 °C el intervalo de variación de la temperatura ambiente, que p.e. en la luna es de unos 200 °C. Hoy día, el único sistema ingenieril practicable es el bombeo hidroeléctrico, aunque se ha ensayado la producción de hidrógeno por electrólisis de agua (y, por supuesto, se puede utilizar la producción de biomasa, aunque los efectos ecológicos todavía son una incógnita). También se puede almacenar energía desacoplando los elementos de las centrales térmicas (almacenando el vapor de la caldera o el aire comprimido del compresor y pasándolos por sus respectivas turbinas cuando se necesite).

Pese a que muchas veces el consumo final se quiere que sea térmico (p.e. calefacción y cocina), como la conversión trabajo→calor es facilísima y la calor→trabajo muy difícil, la distribución de energía de alto nivel (eléctrica), aunque sea más cara, va aumentando proporcionalmente más. Normalmente la energía eléctrica se compra a las compañías suministradoras, aunque la autoproducción (≈6% en España) suele ser rentable para grandes consumidores o consumos extraviados.

Conversión de la energía

Toda evolución tiende a convertir la energía ordenada (mecánica, eléctrica, química, luminosa) en energía desordenada (térmica) debido a la tendencia al incremento de entropía del universo. Por eso es tan fácil transformar cualquier energía en energía térmica, así que, cuando no se sabe transformar directamente una energía en otra, se transforma la primera en energía térmica y ésta (ya sólo parcialmente) se transforma en la segunda. Normalmente, como la conversión entre energía mecánica y eléctrica se hace con gran rendimiento ($\approx 95\%$) y teóricamente no tiene por qué haber pérdidas, al hablar de conversión de energía se supondrá la energía mecánica y la eléctrica intercambiables.

Aunque tradicionalmente se ha venido usando el rendimiento energético como característica de los dispositivos de conversión de energía, en realidad es el rendimiento exergético el que mide la eficacia termodinámica de la conversión (p.e., es más eficiente en la conversión energética un motor diesel de rendimiento energético 0,4 que una caldera de rendimiento energético 0,8).

Por ejemplo, para transformar energía térmica en energía luminosa se procede a concentrar la energía térmica elevando la temperatura de una parte del sistema a expensas de la energía de otra parte y de la interacción con el ambiente exterior; para transformar energía térmica en energía cinética se hace una expansión en una tobera; para transformar energía térmica en energía eléctrica directamente se pueden usar pares termoeléctricos (el rendimiento energético es $\eta_e \approx 0,08$) o dispositivos termoiónicos (no son prácticos); para transformar energía térmica en energía mecánica se utilizan turbinas de vapor ($\eta_e \approx 0,35$), turbinas de gas ($\eta_e \approx 0,25$) o motores alternativos ($\eta_e \approx 0,40$); si la transformación se hace para mover un vehículo se suelen llamar motores térmicos y si se trata de generar electricidad, centrales térmicas.

Normalmente, se consideran como energías primarias convencionales los combustibles fósiles, la energía nuclear y la hidroeléctrica; de éstas, sólo la hidroeléctrica es renovable. Pero también es importante considerar la conversión de energías no convencionales en energía mecánica (o eléctrica), ya que, aunque su incidencia cuantitativa en el conjunto de los recursos energéticos comercializados es mínima (ni aun para el año 2000 se espera que supere el 5% del consumo mundial), localmente su aprovechamiento resulta de gran interés.

Entre ellas tenemos la energía solar (directamente a eléctrica en células fotovoltaicas o a través de energía térmica en centrales termosolares, o incluso a través de la biomasa) con rendimientos del 6% para células de silicio policristalino, del 12% para células de silicio monocristalino, y hasta del 25% para células con una concentración de 500 veces⁵.

El aprovechamiento a través de la biomasa (cultivos para ser quemados) tiene la enorme ventaja de su almacenamiento, pero de momento es poco rentable. En realidad, al hablar de la biomasa se refiere uno a la biomasa renovable (primaria más residual); la biomasa primaria es la que se sintetiza a partir de materia inerte (H_2O y CO_2) con la radiación solar; la biomasa

5. Ultimamente se han ensayado pilas de doble capa, de arseniuro de galio y de antimoniuro de galio, que absorben en diferentes bandas del espectro y llegan a un rendimiento del 35%.

secundaria es la que se genera por cadenas biológicas (reino animal); la biomasa residual es la parte que el hombre no aprovecha de la biomasa (primaria y secundaria); la biomasa renovable es la parte que la Naturaleza es capaz de generar anualmente.

La energía eólica es muy errática y las instalaciones se deterioran rápidamente; en California hay un parque de aerogeneradores que dan 670 MW en total. Las potencias unitarias normales son de 1 MW.

La energía geotérmica (aprovechando gradientes térmicos a través de la corteza terrestre) es sólo practicable si existen manantiales naturales de agua caliente o vapor, como en la planta *The Geysers* en California⁶, donde se obtienen más de 1000 MW a partir de vapor a 180 °C y 0,75 MPa. La energía oceanotérmica se basa en el aprovechamiento del gradiente térmico entre la superficie del mar y las profundidades, y ya fue propuesta por D'Arsonval en 1881. La energía mareomotriz, la energía del oleaje, la energía radiactiva (por desintegración de isótopos naturales), etc., sólo han encontrado aplicaciones muy especiales.

Pudiera parecer extraño que siendo los sistemas fotovoltaicos la fuente de energía de la mayoría de los vehículos espaciales desde hace treinta años, sigan siendo no competitivos en aplicaciones terrestres (excepto en calculadoras y relojes), pero hay que tener en cuenta que, aparte de los peculiares condicionantes de fiabilidad y sencillez, las células solares en la tierra reciben 15 veces menos energía solar por causa de las noches y del filtro atmosférico.

Se utilizan energías no convencionales en aplicaciones especiales, p.e. en lugares remotos de difícil mantenimiento (radio-boyas, radio-balizas), pero además de estos usos continuos, son de gran interés las aplicaciones para casos de emergencia; piénsese la ventaja de poder operar un pequeño radiotransmisor móvil con un generador fotovoltaico, o con un generador termoeléctrico alimentado por cualquier tipo de materia combustible. La biomasa sólo se utiliza en las industrias que ya de por sí manejan mucha biomasa (madereras, azucareras, destilerías, agropecuarias, etc) y, aunque antes sólo se usaba para generación de calor, últimamente se están comercializando muchos equipos de cogeneración con turbina de gas (se necesita una gasificación previa, con aire caliente o vapor, pero que es mucho más eficiente que los gasificadores de carbón).

Relacionado con el uso de energías no convencionales y particularmente con la biomasa, hay que citar la producción de combustibles sintéticos, sobre todo líquidos para sustituir a las gasolinas. Los sistemas más prometedores son los de obtención de alcohol (metanol o etanol) a partir de la biomasa mediante cultivos alimenticios (como la caña de azúcar en Brasil o el maíz en USA) o celulósicos (madera, forraje). Algo distinto es el caso de la obtención de estos alcoholes a partir del gas natural o el carbón, pues en este caso sólo se trata de una transformación intermedia de los combustibles naturales convencionales. Téngase en cuenta que estos combustibles líquidos sintéticos presentan muchas ventajas frente a las gasolinas: tienen un índice de octano de 100, una velocidad de llama mayor, una presión de vapor mayor (se facilita el arranque), y contaminan menos, aunque su poder calorífico es menor. A

6. Esta es la mayor planta geotérmica del mundo, y se viene explotando desde 1960, cada vez perforando más pozos hasta que desde 1987 (en que se alcanzaron los 2000 MW eléctricos) se viene notando un agotamiento por falta de agua subterránea (se está ensayando la inyección artificial de agua, pues la roca sigue manteniendo su poder geotérmico).

modo orientativo pueden citarse los siguientes precios-1991 de coste de producción: 15 Pta/litro la gasolina, 40 Pta/litro el metanol de carbón o de biomasa, 50 Pta/litro el etanol de biomasa. Por otra parte, no hay que olvidar que el poder calorífico por unidad de masa de los alcoholes es del orden de la mitad del de las gasolinas.

Otro aspecto de interés es la conversión directa de la energía, que en general se refiere a la conversión de la energía química de los combustibles fósiles (todavía no se piensa en hacerlo con la energía nuclear) directamente en energía eléctrica (o mecánica), aunque a veces también se incluye aquí la transformación directa de energía solar en energía eléctrica e incluso la conversión de energía térmica en energía eléctrica sin fluido de trabajo (convertidores termoeléctricos y termoiónicos).

El sistema más desarrollado es la pila de combustible (ya se obtienen rendimientos energéticos de 0,7), aunque también se han hecho progresos con el generador magneto-hidrodinámico (MHD).

Hay varios tipos de células de combustible en desarrollo comercial (las utilizadas desde los años 60 en los viajes a la Luna son excesivamente caras, pero ya eran capaces de transformar hidrógeno y oxígeno en electricidad para los equipos y agua para los tripulantes, sin producir contaminante alguno). Para aplicaciones terrestres, el tipo más estudiado usa ácido fosfórico como electrolito, operando a 200 °C con hidrógeno como combustible y aire como oxidante (el hidrógeno se puede obtener del metano del gas natural o de biomasa, o de gas de agua), llegando a un rendimiento energético del 40%. Otro tipo de célula más novedoso usa una mezcla de sales fundidas de carbonatos alcalinos, funciona a 650 °C y alcanza un rendimiento del 55%. Cuando se utilizan para cogeneración (su primera aplicación comercial), estas células pueden llegar a rendimientos energéticos del 80%, y sin generar contaminantes, ni siquiera ruido. Además, debido a su estructura modular, mantienen el mismo rendimiento para cualquier carga (se hace funcionar el número de células adecuado).

Almacenamiento de energía

Ya se ha visto al considerar el aprovechamiento de los recursos energéticos la importancia del acoplamiento entre la oferta y la demanda, y por tanto la conveniencia de disponer de un almacenamiento intermedio que las adapte óptimamente. En general, el almacenamiento de energía va ligado a una masa material en un ambiente dado, y lo que en realidad interesa es la exergía del conjunto que puede liberarse al interaccionar el almacén con el ambiente. Como ejemplos se pueden citar:

- una masa de combustible en una atmósfera oxidante
- una masa caliente en un ambiente frío
- una masa de productos electrolíticos en un ambiente conductor
- una masa en un campo gravitatorio en el que pueda caer, etc.

Los parámetros más importantes en el almacenamiento de energía son la concentración (exergía por unidad de masa y exergía por unidad de volumen), la convertibilidad (facilidad de paso a la forma final deseada; p.e., es muy fácil producir trabajo a partir de un almacén de aire comprimido, y muy difícil si el almacén es de uranio), el riesgo de daño, las pérdidas, el coste, etc.

El almacenamiento más fácil es en forma de energía primaria (como se encuentra en la naturaleza: combustibles fósiles, uranio y agua embalsada), construyendo almacenes artificiales cercanos a los centros de producción, de transporte y de consumo. Sin embargo, la baja exergía específica del agua embalsada y las complejísimas instalaciones que requiere la fisión del uranio, hacen que en general sólo se considere práctico el almacenamiento de energía en forma de combustibles fósiles, principalmente los derivados del petróleo, y el carbón.

El almacenamiento de recursos primarios dinámicos (energía solar, eólica, mareomotriz, etc) o de recursos secundarios (energía eléctrica, mecánica, térmica) es mucho más difícil y costoso, pues en la mayoría de los casos se requiere la conversión a otro tipo de energía más sencillo de almacenar, y la posterior reconversión al tipo de energía deseado. Por ejemplo, si se quiere almacenar la energía luminosa del sol para alumbrar por la noche, se puede utilizar simplemente una pintura fosforescente, pero es tan ineficaz que, excepto en contadas aplicaciones (como la iluminación pasiva de emergencia), es más práctico almacenar la energía solar en una batería electroquímica con ayuda p.e. de convertidores fotovoltaicos y luego conectar la batería para calentar hasta la incandescencia el filamento de una bombilla para que emita radiación visible, pese a que aun en este caso el rendimiento energético global es del orden de 10^{-3} .

El almacenamiento secundario puede clasificarse según el modo de almacenar la energía (independientemente de cómo le llegue y cómo la devuelva) en:

- mecánico (volante de inercia, gas o vapor a presión, pesa, muelle). Se usa mucho para poca energía y tiempos cortos, y son fácilmente recargables.
- electroquímicos (pila estanca, batería reversible). Las baterías son los sistemas convencionales por excelencia, aunque la concentración de energía no es muy grande y las pérdidas apreciables.
- termoquímicas (en fase de desarrollo). Se basan en la conversión de energía secundaria eléctrica o térmica en energía química (p.e. hidrólisis del agua) en un reactor endotérmico, almacenando los reactivos generados para su posterior paso a energía eléctrica en un reactor exotérmico (los productos se suelen almacenar para su regeneración). El sistema más desarrollado es la célula de combustible de $H_2/O_2/H_2O$, que requiere energía eléctrica para la regeneración de los reactivos por electrolisis, aunque se están investigando otros sistemas como el $CaO(s)/H_2O(l)/Ca(OH)_2(s)$ que se regenera calentando por encima de 750 K, o el $MgO(s)/H_2O(l)/Mg(OH)_2(s)$ que se regenera calentando por encima de 550 K, o los de fase gaseosa, que presentan la ventaja de poder desacoplar los reactores de carga y descarga y situarlos a distancia, haciendo fluir los productos por tuberías, como el sistema $SO_3/SO_2/O_2$ o el $CH_4/H_2O/CO/H_2$, que utilizan catalizadores.
- térmico (agua caliente). El almacenamiento de energía térmica sensible es muy usado, pese a sus enormes pérdidas, por su simplicidad. El almacenamiento con cambio de fase (energía latente) es más eficaz, utilizándose sales hidratadas, aunque con el tiempo

acaban descomponiéndose. La más usada es la sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), la cual se disuelve en su propia agua de cristalización a unos $32\text{ }^\circ\text{C}$ con una entalpía de cambio de fase de $0,21\text{ MJ}$ por kg de sal.

Se podría añadir también el almacenamiento de energía fotoquímico, pero de momento la ingeniería de este proceso sólo está en manos de la naturaleza.

Optimización de los recursos energéticos (potencia, calor y frío) demandados

Un consumidor puede requerir energía para muy diversos fines. Por ejemplo, desde el punto de vista histórico, el hombre ha ido requiriendo energía para alimentación (metabolismo), iluminación, calor, trabajo y frío. No se trata aquí la demanda bioenergética ni la fotoenergética, sino sólo la termoenergética. Para centrar ideas se va a utilizar el modelo de demanda energética representado en la Fig. 19.5 (lo que debe suministrar la estación de transformación energética). Si en lugar de aire y agua (o además de éstos) interviniesen otras sustancias, se haría de modo similar, recordando que tanto la energía como la exergía son aditivas. Pero antes de desarrollar este modelo, conviene hacer unas consideraciones sobre las condiciones de contorno que se van a suponer para simplificar el problema.



Fig. 19.5. Esquema de entrada/salida para una típica estación de transformación energética.

El objetivo deseado puede resumirse en el deseo de variar la energía almacenada en ciertas sustancias (aumentar la del agua, disminuir la del aire) todo ello a expensas de la disminución de la de la mezcla combustible; si se trata de un proceso continuo, lo que se quiere es obligar a que haya un flujo energético a través de una sustancia (flujo de trabajo a través de un cigüeñal, flujo de calor al recinto a calentar, flujo de calor desde el recinto a enfriar, etc). Las exigencias energéticas que demanda un consumidor pueden caracterizarse por varios atributos (los cuales no suelen estar bien definidos a priori): cantidad de energía, calidad de la energía (trabajo, calor a $60\text{ }^\circ\text{C}$, calor a $300\text{ }^\circ\text{C}$, frío a $-10\text{ }^\circ\text{C}$), distribución temporal, distribución espacial, esquema de prioridades (penalización por falta de suministro sin previo aviso, por tiempo mínimo de alerta), etc. En general, se podrá poner formalmente que se requiere un vector (cantidades) de energía $\dot{Q} = \dot{Q}(T, t, x, \pi)$, donde T , t , x y π se refieren al atributo temperatura (que mide la calidad), al tiempo, al espacio y a las prioridades, respectivamente, y donde al flujo de trabajo le correspondería un \dot{Q} con una temperatura equivalente infinita.

No hay que infravalorar la importancia del vector de prioridades, pues en los consumos en los que el almacenamiento no es posible pueden lograrse enormes beneficios si la demanda

es susceptible de aprovechar óptimamente la oferta. A modo de ejemplo, es fácil comprender que un mismo pasaje de avión cueste menos al veraneante que prevé con más de un mes de antelación su viaje, que al hombre de negocios que de la noche a la mañana decide realizar el mismo viaje (supuesto que se trata de asegurar el viaje a ambos); y que todavía cueste menos al pobre ciudadano que sea capaz de aceptar un billete "de relleno" que sólo le permite viajar si, llegada la hora del vuelo, la compañía no hubiese podido vender todos los billetes con reserva. Hasta hace poco, la complicación burocrática que suponía el tasar a cada consumidor con el coste real del servicio consumido era tan grande, que se optaba por repartir todos los gastos entre todos los consumidores de una manera indiscriminada. Sin embargo, con la actual revolución informática ya han aparecido tarifas energéticas que dependen del horario del consumo (parece lógico que no se pague al mismo precio la electricidad nocturna o la de fin de semana, cuando a la red le sobra, que la del pico del día). La disponibilidad de eficientes almacenes de energía introduciría grandes cambios en los perfiles temporales de consumo, con el consiguiente ahorro, por lo que es una de las áreas actuales de investigación energética.

Sin embargo, no se va a analizar aquí ni la dependencia de las prioridades, ni la espacial (que muchas veces es la clave de la optimización, p.e. al poder transportar calor o frío fácilmente entre centros de consumo próximos), ni siquiera la temporal (que es básica para las previsiones de almacenaje de combustibles y residuos). Con estas simplificaciones, el problema planteado en la Fig. 19.5 se reduce a calcular el coste energético mínimo para conseguir un flujo de aire frío de gasto \dot{m}_a en las condiciones T_{af}, p_{af} , un flujo de vapor de agua sobrecalentado de gasto \dot{m}_w y condiciones T_{wc}, p_{wc} , y una potencia eléctrica P_e , todo ello partiendo de dichas sustancias a presión y temperatura ambientes y de una mezcla combustible.

La Termodinámica enseña que un sistema puede producir trabajo en su evolución hacia el equilibrio, y que se obtiene el máximo si la evolución se realiza sin aumento de entropía en el universo; en lugar de un sistema sin equilibrio interno, la mayoría de las veces se puede considerar un sistema en equilibrio en presencia de una atmósfera infinita. A la inversa, para producir un desequilibrio en un sistema (normalmente entre un sistema y el ambiente) se requiere comunicarle una cantidad de energía que es mínima también cuando no hay aumento de entropía del universo. El trabajo mínimo (exergía) necesario para conseguir el objetivo de la Fig. 19.5 será:

$$W_{\min} = \Delta\dot{\Phi} = \dot{m}_a \left[\left(h_{af} - h_a^\oplus \right) - T^\oplus \left(s_{af} - s_a^\oplus \right) \right] + \dot{m}_w \left[\left(h_{wc} - h_w^\oplus \right) - T^\oplus \left(s_{wc} - s_w^\oplus \right) \right] + P_e \quad (19.5)$$

Nótese que el coste energético depende del nivel medioambiental de referencia, que puede ser el estado local temporal, o un estándar estacional, o anual, o regional, aunque cuanto más se trate de promediar y generalizar más se alejará de la realidad, como ya se discutió en el Cap. 3.

Para conseguir la variación de estado energético de las sustancias con este aporte energético mínimo la evolución ha de ser muy especial, el llamado camino perfecto, el cual, además de sin degradación de energía interna (ni fricciones, ni gradientes térmicos ni de composición),

no ha de degradar energía en su interacción con la atmósfera exterior (durante la transmisión de calor con el ambiente la temperatura del sistema ha de ser prácticamente la del ambiente, y no se ha de acelerar el fluido atmosférico). La representación del camino perfecto en el diagrama $T-s$ para ambas sustancias se expone en la Fig. 19.6. Aunque en la práctica el camino perfecto es inviable, este límite es de gran interés para la optimización de los procesos energéticos reales, mostrando el margen de posible mejora de cada proceso, lo que permite al analista concentrar su esfuerzo optimizador en aquellos procesos susceptibles de una mayor mejora, a la vez que le capacita para hacer una valoración racional del coste comparativo de los diferentes tipos de energía demandados.

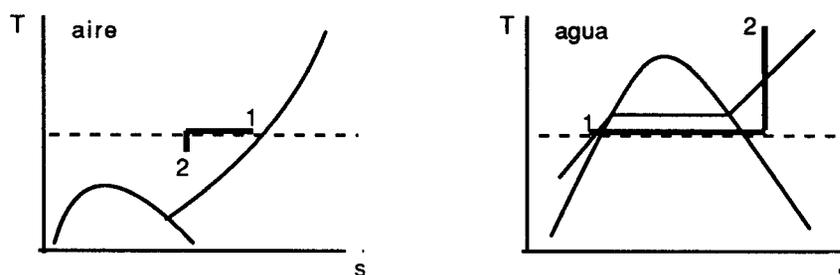


Fig. 19.6. Caminos perfectos (sin producción de entropía) para los procesos de la Fig. 19.5.

Una vez definido el objetivo (obtener aire frío, vapor de agua sobrecalentado y electricidad) y calculado el coste mínimo termodinámico (aunque sea un límite inalcanzable), se trata de estudiar cuáles son las diferentes posibilidades que ofrece el mercado y con ello idear un camino práctico para conseguir el objetivo y evaluar el coste real.

Las disponibilidades normales para satisfacer la demanda (aparte casos especiales) son:

- fuentes externas de energía (combustibles y, normalmente, electricidad),
- aparatos de conversión de energía.

La electricidad se podría generar a partir del combustible, el frío se podría generar con una máquina refrigerante a partir de la electricidad o el combustible, y el calor se podría obtener directamente quemando combustible en una cámara de combustión o disipando energía eléctrica en una resistencia, o incluso bombeando calor con una bomba movida por electricidad o por el combustible. Además de estos aparatos, se pueden utilizar cambiadores de calor para transvasar energía térmica de una sustancia a otra, así como bombas, compresores, turbinas, válvulas y demás componentes usuales de las instalaciones termofluidodinámicas.

Se ve que existen muchas soluciones prácticas para conseguir el objetivo deseado con las disponibilidades reales, y la optimización deberá basarse en criterios económicos que vendrán influenciados (aunque no siempre controlados) por criterios energéticos. La solución más cómoda desde el punto de vista del diseño es no usar combustibles (si ello es factible, pues si p.e. se trata de equipos móviles, puede no resultar factible), adquirir energía eléctrica exclusivamente y no preocuparse de optimizar las interacciones entre los diferentes centros de consumo; es decir, enfriar el aire con un refrigerador eléctrico y calentar el agua con una resistencia eléctrica (consiguiéndose en ambos casos las diferencias de presión necesarias con bombas, compresores o válvulas, según corresponda).

Una optimización que siempre se hace (porque no cuesta nada) es la de disponer los aparatos en la secuencia más ventajosa. Así, si se trata de pasar aire atmosférico a una presión mayor y una temperatura menor que la atmosférica, puede demostrarse que es mejor comprimir, dejar enfriar y luego refrigerar, que empezar refrigerando y luego comprimir. Pero hay que optimizar más. La cómoda solución anteriormente descrita (todo electricidad) no suele ser rentable por su despilfarro energético, y entonces se hace necesario disminuir el consumo energético, es decir, tratar de acercarnos más al camino perfecto (el de consumo mínimo), en el cual sólo había transformaciones isentrópicas y transformaciones isotérmicas a la temperatura ambiente. Aproximar una evolución isentrópica es relativamente sencillo, pues basta evitar el intercambio de calor con el exterior y las degradaciones internas de energía. Para empezar, aunque no se utilicen aislamientos térmicos especiales, si el proceso es rápido el intercambio de calor será despreciable, pero disminuir la generación interna de entropía es más difícil porque se desea que existan flujos de masa y el gradiente de velocidades y la viscosidad se encargan de disipar energía mecánica (convendrá que los dispositivos de flujo estén diseñados de tal manera que no aparezcan fuertes gradientes de velocidad, no se desprenda la corriente, el nivel de turbulencia sea bajo, y los efectos viscosos queden confinados a delgadas capas límite). Los dispositivos que se utilizan en la práctica para aproximar procesos isentrópicos son los compresores y expansores, tanto volumétricos como rotodinámicos; dependiendo del tipo y tamaño de la máquina, los rendimientos isentrópicos varían de 0,60 a 0,85 para los compresores y de 0,75 a 0,90 para las turbinas.

En cambio, aproximar los procesos isotérmicos es prácticamente imposible, ya que la transmisión de calor vendrá gobernada por la ecuación $Q=UA\Delta Tt$, siendo Q el calor necesario, fijado por el objetivo, U (la transmitancia térmica, $W.m^{-2}.K^{-1}$, dada por los materiales y la configuración), A el área de intercambio (que será finita), ΔT el salto de temperatura entre el sistema y el ambiente (que ha de tender a cero en el camino perfecto), y t el tiempo que dura el intercambio (que habrá de ser pequeño para que el equipo rinda bastante). La única solución práctica es permitir que el salto de temperatura sea finito (lo suficientemente pequeño para desviarse lo mínimo del camino perfecto, pero lo suficientemente grande para que no se requieran áreas de intercambio grandes que encarecen el equipo). Como en la práctica los cambiadores de calor son casi isobáricos (excepto por la pérdida de presión por fricción), lo que se hace es aproximar las evoluciones isotermas (horizontales en el diagrama $T-s$) por una especie de dientes de sierra (Fig. 19.7) que corresponden a pequeñas compresiones o expansiones seguidas de pequeños enfriamientos o calentamientos; cuantos más pequeños estos dientes de sierra más se aproximará a la isoterma y por tanto será más eficiente energéticamente, pero requerirá cada vez mayor número de equipos (eso sí, más pequeños) y habrá que llegar a un compromiso entre el ahorro energético en el funcionamiento y el incremento en el coste inicial de la instalación.

Todas estas actividades de gestión energética se podrían resumir en dos grandes áreas:

- contabilidad analítica continua (evaluación del consumo esperado y medida del consumo producido),
- auditoría de diagnóstico (estudios esporádicos de evaluación del funcionamiento actual y de las posibilidades, viabilidad y oportunidad de futuras mejoras previsibles).

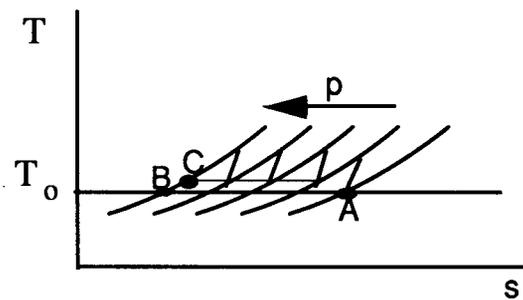


Fig. 19.7. Aproximación de la compresión ideal (isoterma AB) por un proceso práctico de compresiones adiabáticas con refrigeración intermedia (AC). T_C será siempre algo mayor que T_B .

Uno de los mayores problemas que surgen en la gestión energética, sobre todo a la hora de las auditorías, es la escasez y baja fiabilidad de los medios de diagnóstico incorporados a las instalaciones térmicas.

Contaminación ambiental

El hombre, como individuo y como colectividad social, necesita vivir a expensas del medio ambiente que lo rodea (son sistemas abiertos en régimen no estacionario que necesitan evacuar cuando menos la entropía que generan). Para su desarrollo, los sistemas vivos necesitan un continuo aporte de recursos vitales (masa y energía), y se ven forzados a evacuar productos de desecho (masa y energía). El ambiente natural, la biosfera terrestre, es un sistema termodinámico mucho mayor que el sistema formado por todos los seres humanos que en él viven (p.e. la masa de la atmósfera ya es $\approx 10^6$ veces la masa de la humanidad), y hasta época reciente no había que tener cuidado más que de asegurarse la disponibilidad de recursos vitales: agua y alimentos (agricultura, ganadería), ya que el aire está siempre disponible, su almacenamiento y distribución, y de deshacerse de los subproductos (ventilación, eliminación de aguas residuales, basuras, etc), aunque en este caso eliminación quería decir simplemente echarlo a un lado.

Hasta época reciente la actividad humana era muy limitada a escala planetaria (actividades domésticas individuales y actividades artesanales en núcleos de población pequeños, mayoritariamente en ambiente rural⁷, y era difícil imaginar que las actividades en una parte del mundo se notasen en las otras. Ha sido especialmente la llegada de los vuelos espaciales, donde cada hora y media se ven pasar todas las partes del mundo (satélites en órbita baja), o donde se tiene una visión permanente de casi medio mundo (satélites geoestacionarios) lo que más ha ayudado a darse cuenta de que la biosfera es una exigua y delicada cáscara compartida por toda la humanidad. La Fig. 19.8, donde se muestran los ángulos de visión de ambos tipos de satélites, trata de dar aún más realismo a este aserto (en ella el espesor de la biosfera resultaría menor que el grosor del trazo de la circunferencia).

Por cuantía, la actividad humana más contaminante es la combustión. A este respecto resulta revelador comparar la población humana en 1990, unos $5 \cdot 10^9$ habitantes, con la de vehículos

7. Suele considerarse como núcleo urbano una comunidad interdependiente, es decir, donde cada grupo se especializa en una actividad y depende para las demás de los otros, a diferencia de las agrupaciones rurales, en donde cada familia es prácticamente autónoma en su abastecimiento.

a motor, $5 \cdot 10^8$. Desde que el hombre dominó el fuego (ya lo sabía producir artificialmente hace unos 30000 años) y sus múltiples aplicaciones (iluminación, calefacción, procesado de alimentos y de materiales ingenieriles), se vio obligado a soportar el humo sucio, irritante y tóxico, asociado. Hasta la llegada de la Revolución Industrial, el humo era de madera, sus compuestos contaminantes consistían en hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos parcialmente pirolizados, y su escala era tan pequeña que sólo daba lugar a problemas locales de contaminación. Con la llegada del carbón se añadieron las cenizas volantes, los óxidos de azufre y los de nitrógeno y ya empezaron a surgir algunos problemas ecológicos globales, aunque en aquél entonces la mejora de la calidad de vida en los centros industriales hacía incluso desear esa contaminación fabril.

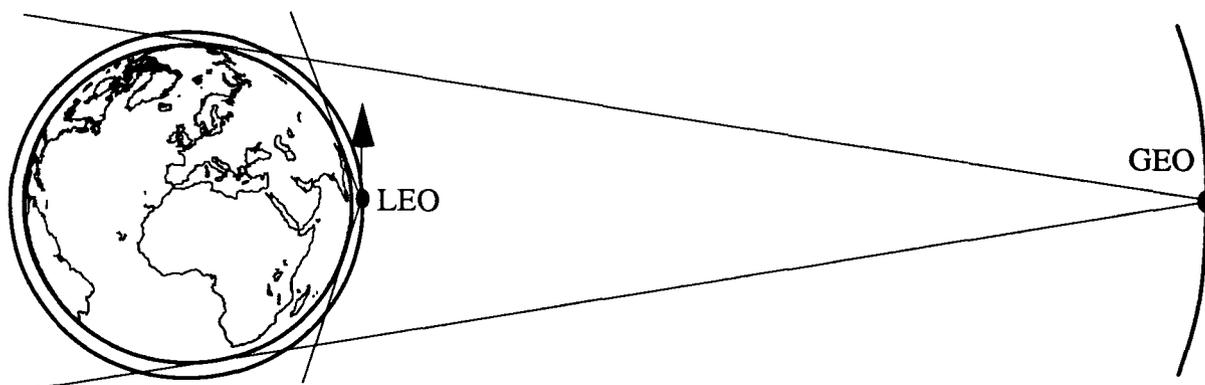


Fig. 19.8. Ángulo de visión del planeta Tierra desde las alturas típicas de observación espacial: LEO, órbita baja (unos 400 km de altura) en la que en vuelo balístico el satélite ha de dar la vuelta a la Tierra en una hora y media; GEO, órbita geoestacionaria (unos 36 000 km de altura) en la que el satélite gira a la misma velocidad que la Tierra y aparece inmóvil.

Los problemas globales de la contaminación pueden resumirse así:

- Aire viciado en ciudades industriales, particularmente en épocas de inversión térmica atmosférica (apareciendo problemas respiratorios a los 3 o 4 días de falta de vientos).
- Niebla química (*smog*) sobre grandes núcleos urbanos muy soleados, debida a los óxidos de nitrógeno, ozono e hidrocarburos nitrogenados. Nótese que el ozono es necesario en la estratosfera para absorber las radiaciones UV del Sol, pero es perjudicial en la atmósfera porque descompone el N_2 .
- Lluvia ácida, que precipita en forma de aerosoles ácidos al cabo de una semana o así de recorrido de vientos contaminados con óxidos de azufre y de nitrógeno en atmósferas húmedas, y acidifica aguas, tierras y vegetación.

Hoy día la mayor contribución a la polución atmosférica es debida a las emisiones de los 500 millones de motores alternativos que hay en el mundo. Los de ciclo Otto funcionan con mezcla rica ($\phi \approx 1,1$) y generan del 1% al 5% de CO y 0,1% de NO, mientras que los Diesel, aunque funcionan con mezcla más pobre ($\phi \approx 0,5$), generan más productos inquemados (aldehidos malolientes) y hollín (a veces se denomina a todos estos contaminantes compuestos orgánicos volátiles (COV)). Las turbinas de gas generan principalmente óxidos de nitrógeno.

Además de esta contaminación material generada por los procesos de combustión, hay que añadir otros efectos contaminantes de la ingeniería energética (no se consideran aquí los propios de la ingeniería química, o del arrastre pluvial de fertilizantes y pesticidas agrícolas):

- Contaminación térmica local, es decir, el incremento de temperatura no deseado en las actividades energéticas, como el calentamiento de las aguas de los ríos y embalses usados para refrigerar centrales térmicas (que puede poner en peligro la flora y fauna cercana), el calor de la iluminación y los frigoríficos en verano, etc.
- Contaminación térmica global y efecto invernadero, que es la contribución al calentamiento global de la Tierra por aumento de la opacidad de la atmósfera frente a las radiaciones infrarrojas que enfrían la Tierra, causada por un aumento de la concentración global de dióxido de carbono, que es del orden de 300 ppm en media y va aumentando casi 1 ppm por año, lo que da lugar a un aumento de 1 °C por siglo. Este calentamiento origina un deshielo de los casquetes polares que favorece la absorción de la radiación solar todavía más.
- Contaminación por aditivos, como la de óxido de plomo (PbO) producida por descomposición del aditivo $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ antidetonante añadido a las gasolinas.
- Contaminación por pérdida de fluido de trabajo en máquinas térmicas, particularmente el cloro de los compuestos cloro-fluoro-carbonados (CFC) que ataca la capa de ozono ionosférica que nos protege de las radiaciones ultravioletas dañinas.
- Contaminación por residuos y accidentes nucleares, que dan lugar a emanaciones de gases radioactivos ionizantes.

En nuestros días, la actividad humana genera unas transformaciones energéticas a un ritmo del orden de 10^{13} W, que aunque todavía es muy inferior a los 10^{17} W de energía solar (que a fin de cuentas es la que soporta la vida en la Tierra), ya es mucho mayor que la energía metabólica de la humanidad, $\approx 10^{11}$ W. Y no es sólo en términos energéticos; la masa de productos de desecho de la actividad humana ha crecido todavía más (piénsese que casi todo el consumo energético es a través de procesos de combustión que generan casi un orden de magnitud más de masa de productos de escape que la masa de combustible utilizado). Y, lo que todavía es peor, la Naturaleza estaba perfectamente adaptada para el reprocesamiento de los desechos metabólicos, y ahora resulta que la actividad industrial produce una enorme cantidad de residuos (p.e. sustancias radioactivas, compuestos cloro-fluoro-carbonados, plásticos, vidrios, metales, óxidos y ácidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, polvo, etc.) para los cuales parece que la Naturaleza no es eficiente en su reprocesamiento, es decir, no es capaz de mantener las condiciones vitales acostumbradas, apareciendo una contaminación ambiental progresiva.

La lucha contra la contaminación es una batalla desigual por los siguientes condicionantes actuales:

- La energía primaria es globalmente barata (se pincha en el sitio apropiado y sale petróleo).
- El beneficio en el consumo de energía es local (del coche se beneficia su dueño).
- La contaminación es global (de los humos del coche no se hace cargo el dueño).
- Nadie quiere ser el primero en ensuciar menos él y limpiar lo que ensuciamos todos.
- Reducir el consumo energético y/o la contaminación cuesta una inversión inmediata, y el beneficio es a largo plazo.
- Los países industrializados se han hecho ricos ellos a costa de explotar y contaminar todo el mundo en el pasado y ahora piden a los países pobres que no consuman y no contaminen.
- Hay demasiadas desigualdades para ponerse de acuerdo (p.e. la media en USA es viajar 23000 km/año por persona, y en China 500 km/año).

Afortunadamente parece que ya se ha tomado conciencia social de esta problemática, y de ello puede ser ejemplo el que el lema de la Exposición Universal Hannover'2000, que estará dedicada al tema del medio ambiente, sea "hombre-naturaleza-técnica".

Control de la contaminación

La eliminación absoluta de todo tipo de contaminación, al igual que la de otros riesgos vitales, no es practicable, y el hombre está acostumbrado a arriesgar su vida diariamente en su interacción con la Naturaleza y las máquinas artificiales que le sirven de transporte, de trabajo y de ocio⁸.

El objetivo que se debe perseguir no es la total eliminación de la contaminación sino un adecuado control de la misma (y en general de todo tipo de riesgos), tendente a:

- Reducir la contaminación y el riesgo innecesario⁹ (es decir, evitable a un coste razonable).
- Mitigar los posibles daños que se causarían.
- Distribuir adecuadamente el riesgo (proporcionalmente al beneficio obtenido)¹⁰.
- Prever las medidas necesarias para reparar el daño causado.
- Distribuir adecuadamente el coste de reparación.

De manera bastante simplificada, puede considerarse que la contaminación es la presencia de ciertas especies molestas en la mezcla que compone el entorno de interés (p.e. partículas de humo en el aire ambiente). Pues bien, la Física enseña que si, al menos en primera aproximación, esas especies pueden considerarse conservativas, la descontaminación no es posible más que trasladando las especies contaminantes a otro entorno donde no resulten

8. Ya el genial Cervantes en su novela "El licenciado Vidriera" ridiculiza la obsesión desmesurada por la seguridad. En otro orden de cosas, puede decirse que fue la obsesión por la seguridad lo que dio origen al desastre de Chernobyl.

9. Desgraciadamente, cada individuo y cada grupo de interés piensa que lo poco que contamina él es inevitable (costaría demasiado reducirlo) y que lo mucho que contaminan los demás debería reducirse porque apenas cuesta; véase una excelente parodia sobre ello en D.E. Koshland, "Waste not, want some", Science 252, p. 485, 1991.

10. No cargando al vecino la contaminación que uno admite como tolerable para él, como hacen los fumadores con los no fumadores.

molestas al sistema anterior (aunque causarán el mismo tipo de molestias en el nuevo sistema); se puede decir entonces que barrer es empujar la suciedad hacia el territorio vecino. Pero si además se tiene en cuenta no sólo la cantidad de especies contaminantes sino su localización, resulta que la Termodinámica enseña que todo proceso natural sin excepción, incluso los de limpieza, generan desorden y en este sentido esparcen la contaminación de especies conservativas y aumentan la contaminación debida al desorden (contaminación informática). Se puede decir entonces que hasta el barrer genera polvo. Parece concluirse de todo este razonamiento (bastante simplista), que lo mejor para que el polvo no moleste (ni moleste a los vecinos) es dejarlo donde está. Otras veces, resulta más rentable contaminar y luego descontaminar que evitar la contaminación (piénsese cómo deberían trabajar los albañiles si trataran de no ensuciar nada, o cómo comer para evitar que no caiga ni una miga). Y todavía hay más complicaciones: la actividad biológica necesariamente ha de dar lugar a algún tipo de contaminación, ya que en último término un sistema aislado que no se aproveche del exterior tiende a morir en el equilibrio termodinámico.

Pero el desarrollo de la vida en el planeta Tierra ya nos enseña que basta disponer de una fuente térmica caliente (que, si bien es de origen nuclear, está a una distancia segura: el Sol) respecto a un sumidero térmico frío (el vacío interestelar) para mantener un ecosistema viable. El problema es que la actividad humana actual ya da lugar a transformaciones de orden de magnitud significativo frente al tamaño del ecosistema terrestre, por lo que en lugar de actuar como si se dispusiera libremente de un ambiente infinito del que se puede tomar lo bueno (alimentos, agua, energía) y al que se puede echar lo malo (desechos, aguas residuales, humos) sin alterarlo, conviene pensar que se ha de vivir en una nave espacial (al fin y al cabo eso es la Tierra), y desde el inicio de los vuelos espaciales tripulados se evidenció la necesidad de un estricto control ambiental. El problema no es nuevo porque ya en todos sus desplazamientos el hombre hubo de controlar su 'equipaje' con sumo cuidado, y se puso más de relevancia en los viajes por mar debido a los problemas del agua y el escorbuto. Con la tecnología actual, resulta utópico pensar que en la estrechez de las naves espaciales puedan conseguirse ecosistemas autónomos, y en los viajes a Marte que se consideran para las próximas décadas habrá que seguir llevando alimentos enlatados, pero para otros hábitat más holgados (una base lunar o una gran estación espacial) ya hay que ir considerando las posibilidades de establecer ecosistemas cerrados, como en los 25000 m² de la base Biosfera-2 construida en el desierto de Arizona.

El medio ambiente debe ser considerado como un bien económico (bien escaso y codiciado) cuyo único interés es su valor (material y espiritual) para la humanidad. Para controlar la contaminación del medio ambiente se pueden tomar varias medidas:

- Ahorrar contaminantes, es decir, evitar la producción inútil de desechos (p.e. no encender la calefacción en algunos días que, aun siendo de la temporada de invierno, no hace frío). Muchas veces se trata simplemente de cambiar de hábitos de consumo sin disminuir éste (p.e. cambiar un tipo de embalaje por otro).
- Disponer los contaminantes en la forma menos dañina: por dilución, por almacenamiento subterráneo o lejano (p.e. enviar las sustancias más radioactivas a la Luna), por almacenamiento *in situ* pero de forma compacta y segura, etc.

- Transformar las sustancias contaminantes en otras menos dañinas (p.e. neutralizar químicamente, como en los catalizadores de tubo de escape, o quemar los residuos).
- Modificar los procesos que generan mucha contaminación, para reducir ésta (p.e. pasar de la combustión de carbón a la de gas natural, añadir piedra caliza al quemar carbón sulfurado).
- Diseñar nuevos procesos que satisfagan las necesidades con menor producción de contaminantes (p.e. mejorar el rendimiento de los motores y centrales térmicas).
- Restringir la producción de contaminantes con medidas económicas (elevando el precio de los materiales que producen más contaminación).
- Restringir la producción de contaminantes de modo coercitivo (obligando a clausurar las actividades más contaminantes).

Es innegable que adoptar cualquiera de estas medidas, que se pueden resumir en dos: ensuciar menos y limpiar más, supone un esfuerzo, cuando menos de adaptación, y normalmente económico e incluso de restricción de libertades, por lo que se ha de tratar de alcanzar una solución por consenso social, estimulada por una clara información de los costes alternativos y una normativa de precios. Parece lógico que el coste de los productos de consumo tiene que incluir no sólo el coste de producción y distribución, sino el coste de su eliminación ecológica (deposición controlada, incineración, reciclaje, etc.); ésta es la manera natural de controlar la contaminación en una economía de mercado, mediante la autorregulación de la oferta y la demanda, y no de leyes políticas, a veces utópicas en una sociedad donde el bien individual parece que se antepone siempre al bien social.

Tal vez resulte instructivo considerar un proceso concreto para ver la contaminación que produce y los medios de controlarla. Podría elegirse cualquier proceso de gran interés industrial, como la producción de etileno que es la base de la mayoría de los plásticos y uno de los procesos de transformación que más energía consume, o la producción de potencia mecánica a bordo de un vehículo, pero se va a elegir un sistema que seguro que resulta más familiar al lector: una persona adulta y su entorno, poniendo el énfasis en las actividades metabólicas y de aseo personal.

Aun a riesgo de mezclar la Física con la Metafísica, puede decirse que el hombre necesita los siguientes recursos: respirar aire, beber agua, comer alimentos, cobijarse (defenderse del medio ambiente, incluyendo posibles agresiones de otros individuos), curarse de enfermedades y accidentes (podría incluso decirse que la procreación es un remedio global a la muerte individual), educarse (material y espiritualmente) y trabajar para modificar el curso de la Naturaleza en su beneficio y con ello poder procurarse todo lo necesario para los fines antedichos.

La medida del grado de desarrollo o progreso de una sociedad es tarea ardua y dispar, debido a la subjetividad de todos los baremos relativos al comportamiento humano. Respirar y alimentarse parecen difícilmente valorables fuera de la dicotomía vivir/morir (aunque a veces

se utilizan valores como el consumo medio de carne por habitante y año). La vivienda suele valorarse en términos cuantitativos de m^2 /habitante, y en términos cualitativos como porcentaje de viviendas con agua corriente, con alcantarillado, con electrificación, con calefacción, con aire acondicionado, etc. La sanidad suele medirse prioritariamente por la esperanza de vida al nacer. La educación puede medirse por el porcentaje de alfabetización, el porcentaje de titulaciones universitarias, etc. La productividad del trabajo que se desarrolla para conseguir todos esos fines, es decir, el progreso, se mide en términos económicos como la renta per cápita o el producto nacional bruto. Otros indicadores que se usan para cuantificar el grado de desarrollo son el número de teléfonos por habitante, el número de coches por habitante, etc. Es de notar que sólo se da el valor medio de las distribuciones y no las desviaciones típicas. Por otra parte, no es evidente que el bienestar social sea proporcional a la renta per cápita, pues, superado un nivel umbral, es difícil concluir, p.e., que el que más gasta en comida come mejor.

Si se consideran valores medios diarios o semanales (para el aseo general) o incluso anuales (si se incluyera la calefacción y refrigeración), el funcionamiento de este sistema biológico es casi estacionario, con entradas y salidas de masa y energía equilibradas, y se parece bastante al del vehículo apuntado anteriormente.

Para este sistema se puede decir que actualmente (1991) en Madrid los flujos medios de masa y energía, transformados por persona y día, pueden descomponerse en cuatro apartados:

- 4,5 kg de masa metabólica: entran 2,5 de comida, 1,1 de bebida y 0,9 de oxígeno y salen 1,8 de vapor de agua por expiración y transpiración, 1,5 de orina, 1,0 de dióxido de carbono y 0,2 de heces.
- 1 kg de basura: entra como embalajes y partes no comestibles de los alimentos, y sale como residuo sólido.
- 300 kg de agua sanitaria: entran 300 de agua potable (para bebida, comida, aseo personal y lavandería) y salen 100 de aguas orgánicas, es decir, agua de cisterna del inodoro que sale mezclada con los residuos metabólicos) y 200 de aguas inorgánicas, es decir, agua de lavado, ducha, bañera, fregadero y lavadero.
- 100 MJ de energía (1 kW de potencia eléctrica equivalente): entran por la acometida eléctrica o en forma de combustible (p.e. gas canalizado) y salen por transmisión de calor por las paredes al exterior o con los gases calientes por ventilación¹¹.

Aunque pueda parecer, como le parece a algunos industriales reacios a las modificaciones, que es imposible alterar los usos y la contaminación asociada (piénsese cómo se reaccionaría si se cortase la recogida de basura doméstica, o si se interrumpiese el suministro eléctrico o de agua, o los desagües), basta considerar que hasta hace apenas un siglo (y todavía hoy en algunas zonas rurales), el consumo energético era despreciable (apenas se consumía algo de combustible para la cocción de alimentos y el fuego de invierno, y muy poca 'luz'), al igual

11. La media mundial de consumo diario per cápita es de 1,8 kg de carbón, 1,4 kg de petróleo, 1 kg de gas natural, 0,6 kg de alimentos sólidos, 1 kg de oxígeno y 3 kg de agua (bebida y comida).

que era despreciable la producción de residuos sólidos (nada de embalajes) y el consumo de agua sanitaria.

Con relación a las medidas de control de la contaminación expuestas anteriormente, para este sistema se pueden hacer las aplicaciones particulares siguientes:

- **Ahorro.** Está claro que no se puede ahorrar en la respiración, y poco en la alimentación (ahorro en masa, se entiende). En basura se puede ahorrar algo, pero al ser su contribución másica relativa pequeña, la rentabilidad del esfuerzo no sería grande (aunque si se considera no sólo la masa de contaminantes sino su densidad de contaminación, esta ponderación puede variar sustancialmente). En agua sanitaria se comprende que el ahorro potencial es muy grande, y en cuanto hay sequía se recomiendan medidas de ahorro como disminuir el volumen activo de la cisterna del inodoro, cambiar los baños por duchas, lavar y fregar con el tapón puesto (con una pasada con detergente y otra de aclarado), etc. El ahorro en energía también puede ser grande: las nuevas lámparas fluorescentes compactas consumen casi 10 veces menos que las de incandescencia, para la misma iluminación; los nuevos aislantes pueden reducir un orden de magnitud la energía requerida para calefacción y refrigeración; las nuevas cocinas de inducción reducen a menos de la mitad el consumo respecto a las encimeras eléctricas, similarmente para los hornos microondas respecto a los tradicionales, etc. A veces basta sincronizar las actividades para ahorrar (p.e. sacando o metiendo todo lo necesario del frigorífico a la vez, cocinando todo lo que se pueda a la vez, etc).
- **Dilución.** Para una buena respiración y transpiración corporal, es fundamental que se disperse el aire próximo; por esta razón, y no sólo por el consumo de oxígeno, los espacios habitables han de estar ventilados por medios naturales (rendijas en puertas y ventanas) o artificiales (como en los vehículos). Para lavar (las manos, el cuerpo, la ropa, los utensilios de cocina, etc.) se diluye la suciedad en una gran cantidad de agua. El calor evacuado por el equipo de aire acondicionado ha de ser diluido en una gran masa de aire para no molestar a los vecinos. Los contaminantes biodegradables (aquéllos que la Naturaleza es capaz de reprocesar en un tiempo aceptable) pueden diluirse para acelerar su descomposición, pero los que no son biodegradables se van acumulando progresivamente, por lo que han de diluirse mucho, lo que puede ser costoso (p.e., no se pueden verter aguas contaminadas con más de 15 ppm de aceites minerales).
- **Concentración.** Cuando la dilución no rebaja suficientemente la contaminación, o resulta cara en consumo de diluyente, lo más práctico es concentrar la contaminación para su posterior eliminación. Como ejemplo, considérese el lavado de utensilios de cocina con una bayeta, detergente y agua; se puede usar mucha agua corriente hasta dejar limpio el utensilio (y la bayeta), o usar menos agua cerrando la fregadera y lavando muchos utensilios con el mismo agua (con detergente) aclarando después, o usar muy poca agua o ninguna y recoger la suciedad del utensilio con la bayeta, que si es de papel se puede tirar directamente a la basura, y si es más valiosa se puede almacenar hasta que se disponga de más agua para lavarla. A veces se hace un filtrado

parcial para la concentración de los contaminantes principales, o por logística del transporte, como en los desagües de tipo 'pozo negro', donde se almacenan los residuos sólidos y se deja pasar los líquidos. Todos los filtros son en realidad concentradores de las sustancias que retienen.

- Transformación. La incineración de residuos sólidos, ya sea en pequeños incineradores domésticos o en grandes plantas municipales, es una práctica común para eliminar contaminantes (al menos transformarlos, pues la combustión puede no ser muy eficiente y dar lugar a otros contaminantes). En los vehículos donde es necesario almacenar temporalmente desagües orgánicos se utilizan productos químicos para estabilizarlos. Los procesos de transformación pueden ser muy variados, desde la simple desactivación a la completa regeneración del producto original. Téngase en cuenta que una adecuada forestación (proceso natural de bajo coste) transforma el dióxido de carbono que tanto preocupa por el efecto invernadero en oxígeno útil para la respiración animal y los procesos de combustión.
- Modificaciones. Se trata de variaciones en la utilización de recursos para minimizar la generación de contaminantes. Las cocinas y calefacciones eléctricas contaminan menos que las de combustión (al menos en el entorno del usuario, pues no se contabiliza la contaminación en la central). El proceso de lavado por lotes antes aludido consume mucha menos agua que el de lavado en continuo con agua corriente. A este respecto, puede ser interesante optimizar el uso de los tres agentes principales del lavado: cantidad de agua, cantidad y calidad del detergente y tiempo de lavado, con el fin de minimizar el coste medioambiental. Los envases de cartón para líquidos pueden plegarse y los de vidrio no, con lo que puede variar sustancialmente el volumen (y la masa) de basura generada.

Las medidas sociales adoptadas para atajar la contaminación que genera el uso de unos recursos dados, o para atajar el consumo de unos recursos escasos, han sido exiguas, pues casi siempre se han limitado a restricciones coercitivas (cortar el suministro de agua o de electricidad o gas cuando hay escasez). Más imaginativas (aunque no muy efectivas) han sido las medidas encaminadas al control de la contaminación por residuos sólidos urbanos: la mayoría de los municipios cargan una tasa fija por vivienda para la recogida de basura, pues es difícil cuantificarlo de otra manera, aunque ya se ha ensayado en otros la venta de bolsas timbradas que son las únicas que luego se recogen; de esta manera el que más contamina más paga (y la producción de basura disminuye drásticamente). Se han hecho campañas de concienciación social para que los consumidores clasifiquen su basura y separen los residuos orgánicos de los de vidrio, papel, aluminio, mercurio (pilas eléctricas) y otros metales, depositando cada fracción en contenedores distintos (¡incluso separando el vidrio blanco del vidrio de color!), pero la respuesta de la población no es muy solidaria cuando no hay incentivos económicos.

Teóricamente, la Termodinámica enseña que todos los recursos naturales son regenerables si se dispone de una fuente exterior de exergía, en nuestro caso la radiación solar. Por ejemplo, la Naturaleza produce petróleo muy eficientemente mediante la descomposición anaerobia a alta presión de sustancias vegetales que a su vez genera a partir del agua y del aire, aunque

los tiempos característicos son de millones de años. La tecnología actual también es capaz de producir petróleo a partir de agua y aire, y con tiempos normales en los procesos industriales, pero la eficiencia es muy pequeña. El problema de la contaminación es pues la falta de tecnologías que permitan reprocesar eficientemente los residuos naturales de la actividad humana.

Actualmente, los procesos más usados para el reciclado de contaminantes son:

- Separación mecánica: manual, decantación, filtrado, centrifugado, ósmosis inversa, etc.
- Separación térmica: ebullición, congelación, destilación, termoforesis, etc.
- Separación química: absorción, adsorción, catálisis, etc.
- Separación eléctrica y magnética: electrolisis, electroforesis, electroósmosis, magnetismo, etc.

RECAPITULACION

1. Se presenta conjuntamente la problemática de la utilización de recursos energéticos y la del control de la contaminación porque cada vez están más ligadas, principalmente debido a que casi el total de la energía y de la contaminación nacen de procesos de combustión.
2. Para dar una idea global de la problemática energética, se hace un balance energético de la biosfera, el hábitat natural de la humanidad:

$$\dot{E}_{\text{térm}} + \dot{E}_{\text{fósil}} + \dot{E}_{\text{nuclear}} = \dot{Q}_{\text{geotérm}} + \dot{Q}_{\text{absorción solar}} - \dot{Q}_{\text{emisión}} + \dot{W}_{\text{mareas}}$$

3. Se describen las características físicas, logísticas y económicas de los recursos energéticos, incluyendo algunos datos actuales para mejor calibrar el problema de su utilización.
4. Se hace un análisis de los variados principios involucrados en la conversión de energía desde las fuentes primarias a las necesidades últimas de consumo.
5. Como punto clave en la logística de su utilización, se estudia la problemática del almacenamiento de la energía.
6. Se presenta un análisis de optimización de la demanda energética para una industria genérica.
7. Se desglosan las principales fuentes de contaminación, los tipos de contaminantes que generan, y los problemas que originan.
8. Se aborda un concienzudo (aunque meramente cualitativo) análisis del control de la contaminación, uno de los mayores retos actuales de la humanidad y donde la aplicación de las enseñanzas de la Termodinámica puede ser más fructífera.

PROBLEMAS

19.1. Se desea estimar la conveniencia de sustituir bombillas incandescentes de 60 W por lámparas fluorescentes compactas que dan la misma luz consumiendo sólo 15 W. Supóngase que los precios son 100 Pta y 2000 Pta, respectivamente, que el tiempo medio de operación es de 2 horas diarias, que el precio de la electricidad es de 15 Pta/kWh, que los recibos de la luz son bimestrales, y que el interés del dinero es del 10%. En particular, se pide:

- a) Tiempo de amortización de la inversión extra (suponiendo que las de incandescencia ya estaban pagadas), en dinero constante (sin interés).
- b) Tiempo de amortización de la inversión diferencial (suponiendo que las de incandescencia no estaban pagadas), en dinero constante (sin interés).
- c) Tiempo de amortización de la inversión diferencial, con el interés antedicho.

Sol.: a) $t = 4,1$ años; b) $t = 3,8$ años; c) $t = 5$ años.

19.2. Se trata de comparar el coste total durante los 10 años estimados de vida útil de dos frigoríficos domésticos, uno que cuesta 50000 Pta y tiene un consumo medio de 100 W (aislante de espuma de poliestireno), y otro que cuesta 150000 Pta y tiene un consumo medio de 20 W (aislante multicapa), suponiendo que el precio de la electricidad es de 15 Pta/kWh.

Sol.: Poliestireno: instalación 50 kPta, operación 131,4 kPta, total 181,4 kPta; multicapa: instalación 150 kPta, operación 26,3 kPta, total 176,3 kPta.