

La energía, historia de sus fuentes y transformación

Por Roberto E. Cunningham,
director general del IAPG

La historia del hombre es la historia de la búsqueda permanente de fuentes de energía y de sus formas de aprovechamiento, con el propósito humano de servirse del ambiente.

En su devenir la humanidad ha ido generando distintos modelos energéticos (preagrícola, agrícola, agrícola avanzado, preindustrial, industrial e industrial avanzado) que tienen un denominador común, ya que están condicionados por sus fuentes de energía y su aprovechamiento. Además, siempre que se pasó de un modelo a otro se ha registrado un incremento del consumo de energía *per cápita* así como de su consumo global.

Al hablar de la evolución de las especies, lo habitual es referirse a lo que diferencia al hombre de los animales. Mientras que éstos se han adaptado al ambiente, el hombre logró actuar sobre él.

No obstante, no se acostumbra a observar que todos los seres vivos están caracterizados por un denominador común, que es su balance energético. Éste proviene del alimento que sostiene la química de la vida, se disipa en pérdidas de calor y, en el caso del hombre, le permite aprovechar un 20% de la energía captada bajo la forma de energía mecánica, hecho éste también extensivo a otros animales.

Si el balance energético es negativo, el individuo, o bien la especie o la ci-

vilización, comienza a apelar a sus reservas y, si ello continúa, el individuo, la especie o la civilización perecen.

La historia de la humanidad consiste en la historia de la búsqueda de fuentes de energía y de sus formas de aprovechamiento en el inacabado propósito de servirse del ambiente. Evolución es pues, aprovechamiento creciente de energía y valor constante de ésta, independiente de la época, dado por la alimentación (sólo variable por desigualdad socioeconómica), como se verá seguidamente.

Según lo expuesto por Leslie White⁽³⁾, decimos: “La historia de la civilización es la del dominio de las fuerzas de la naturaleza por medios culturales, de tal forma que la cultura evoluciona con-



R. Cunningham durante la conferencia sobre este tema en el II Congreso de Hidrocarburos 2003.

forme aumenta la energía aprovechada *per cápita* en un dado período y la eficiencia de los medios instrumentales para servirse de ella”.

Dicho de otro modo, el proceso evolutivo no ha cesado y la energía es su eje vector.

Modelos energéticos

Resulta entonces natural que en su devenir la humanidad haya ido generando distintos modelos energéticos. No obstante, el hecho de que un modelo determinado impere en una región no quiere decir que se imponga en otros lugares en el mismo momento.

Así pues tenemos distintos modelos energéticos:

- Preagrícola
- Agrícola
- Agrícola avanzado
- Preindustrial
- Industrial
- Industrial avanzado



Estos modelos tienen un denominador común: están condicionados por sus fuentes de energía y su aprovechamiento, y al pasar de un modelo a otro se registra un incremento del consumo de energía *per cápita* y de su consumo global.

Modelo energético preagrícola

Se ubica entre el Pleistoceno (hombre de Pekín) y Paleolítico Superior. En los albores de la historia, el hombre caza y recolecta sus alimentos y procura leña para su cocción (que requiere tres calorías de combustible por cada caloría de alimentos).

El fuego ya lo conocían los australopitecus, 400.000 años a.C. Hay evidencia de ello en las cuevas de Chukotien, en China.

La única fuente de energía del período es la tracción a sangre humana. Aún no se modifica el ambiente. Se vive en tribus; casi no hay herramientas.

La barrera de este modelo es el incremento del aprovechamiento energético *per cápita*.

Modelo energético agrícola

Corresponde a lo que se conoce como Revolución del Neolítico, una de las dos únicas revoluciones que conoció la humanidad, que tiene lugar hace unos 10.000 años en el Asia Central. Es el primer eslabón del control del ambiente por parte del hombre,

que deja su rol de cazador-recolector para pasar a ser pastor-agricultor.

Aparecen los primeros asentamientos, es el caso de Ur y Jericó y le siguen las civilizaciones de los valles (Tigris-Éufrates, Nilo, Indo, Amarillo).

La potencia de tiro se descubre en Asia Occidental en 4500 a.C., y en 3000 a.C. en Sumer; en el valle del Indo ya se emplean vehículos con ruedas.

Como fuentes de energía se tienen la tracción a sangre (humana y animal) y el incipiente uso del viento en navegación a vela.

A partir de Medio Oriente la revolución comienza a extenderse hacia el Este.

La falta de herramientas adecuadas es una barrera para incremento de productividad.

Modelo energético agrícola avanzado

El invento del arado de hierro y la herradura permiten aumentar la productividad del agro, y los del hacha y la reja de hierro hacen posible el talado de bosques; así comienza la era del uso intensivo de la madera (y de su agotamiento como veremos más adelante).

También aparecen herramientas, como martillos, tenazas, sierras, engranajes, palancas, tornillos, cañas y poleas, que multiplican la fuerza humana. También continúa el aprovechamiento de la energía eólica en navegación a vela.

La madera es el distintivo de la época: máquinas, barcos, carros, herramientas, casas; todo es de madera. El hierro, en mínima proporción, completa este panorama.

En tracción a sangre, el tipo de arnés imperante hace que el buey prevalezca sobre el caballo.

La producción agrícola, que se extiende desde los valles hasta las planicies áridas y semiáridas, provoca obras de ingeniería hidráulica para riego que obligan al uso masivo de tracción a sangre.

Se diversifican funciones y se centraliza el poder administrador (Egipto, Mesopotamia, Persia, India).

Se trata de sociedades hidráulicas con control centralizado de la energía, donde surgen nuevas clases sociales (militar, profesional, burócratas) poco dispuestas al cambio. Ello explica el límite de crecimiento y constituye la barrera para el progreso.

Modelo energético preindustrial

El escenario se traslada a la Europa feudal. Se tienen comunidades campesinas dispersas abastecidas por un agro dependiente de lluvias y regidas por un señor feudal con mano de obra antes servil que esclava y que no controlaba las aguas. Por ello, no podía controlar la producción inutilizando todo intento de centralización colectiva.

Esta Europa medieval no se caracterizó por generar innovaciones sino por su habilidad de adaptar inventos de otros, como el timón, la brújula, la pólvora, el papel, el estribo, los molinos y la imprenta.

El nuevo arnés de collera aumentó considerablemente la potencia de tiro del caballo. Se desarrolló un nuevo arado de hierro y ruedas, se rotaron los cultivos, lo que provocó un aumento de productividad.

Se difunden los molinos hidráulicos (ya conocidos en el Imperio Romano) para moler granos, elevar agua, proporcionar energía para hacer pasta de papel a partir de trapos (Ravensburg, 1290), hilar seda, mover herrerías, pulir metales, etc., (Compludo, siglo VII) y en la China, desde el siglo I para soplar aire en hornos de hierro.

Hacia fines del siglo XI ya había 50.000 molinos hidráulicos en Inglaterra con una potencia individual de 1-3,5 CV.

Los molinos de viento, de origen persa, fueron llevados a Europa por las Cruzadas. El primer testimonio es de 1105 en Savigny, Francia. Tenían una potencia de 10-30 CV.

Gracias a los molinos, Holanda se constituye en un país floreciente.

Adam Smith ejemplifica bien el aprovechamiento de la energía cuando dice que un gran carro tirado por ocho caballos, que son guiados por dos hombres, transporta cuatro toneladas de carga y demora ocho semanas para un viaje de ida y vuelta entre Londres y Edimburgo. En cambio, en el mismo tiempo, un barco tripulado por seis u ocho hombres navegando entre los puertos de Londres y Leith, lleva y trae unas 200 toneladas de mercancías. Ello equivale al transporte de 50 carromatos conducidos por 100 hombres y 400 caballos.

Con respecto a lo energético era un

mundo de madera, agua, viento y tracción a sangre, en el que Holanda y los Países Bajos habían alcanzado un excelente equilibrio entre agro e industria. Como ejemplo de calidad de vida, Holanda se distinguía por tener mercados de flores. Madera y tracción a sangre proveían el 80-85% de la energía primaria.

La industria textil mostró notables progresos y desarrollo.

Pero este modelo alcanzó sus límites de crecimiento fundamentalmente debido a la escasez de madera, producto de su consumo indiscriminado.

Por primera vez, la humanidad asistía a un cuello de botella en la provisión de sus fuentes primarias de energía.

Hasta acá, en cuanto a fuentes primarias de energía desde el Preneolítico hasta la era preindustrial, la humanidad había sustentado su aprovisionamiento de energía en un único sis-

tema basado en el complejo tracción a sangre, madera, viento y agua. El único cambio había sido, tecnología mediante, el incremento de la productividad de tal complejo a través de la aparición de nuevas herramientas e ingenios y del aumento de eficiencia.

Como respuesta, Inglaterra nos dio la Revolución Industrial, que cambió de cuajo las estructuras de economía de la producción y el paisaje de bienes y servicios industriales, para insular el mundo que hoy conocemos.

Modelo energético industrial

Este modelo se inaugura con la Revolución Industrial. Si había un candidato para llevarla a cabo, era Holanda y no Inglaterra. Como es obvio, son múltiples las causas de ello, pero hay una fundamental y decisiva: fue

el cambio en el aprovechamiento de una fuente de energía primaria, que implicó la sustitución de dos fuentes gratuitas y de uso libre, como el agua y el viento, por otra de carácter comercial, como el carbón mineral.

La Revolución Industrial tiene una abundantísima literatura que la describe y explica. Al respecto, lo más difundido es el qué y el cómo de ésta, que condensamos en los cuadros que se representan a continuación y que se explican por sí mismos.

De estos cuadros, la única reflexión que cabe es que esta revolución la hicieron obreros, artesanos, técnicos y comerciantes, pero no científicos.

Como instituciones, su centro no estuvo en la celeberrima *Royal Society* (catedral de la ciencia y la tecnología), sino en la *Royal Exchange* (catedral de las finanzas) y en el pub (catedral de la

26-V-1733	Patente de la lanzadera volante (John Kay, relojero de Bury).
24-VI-1738	Patente del huso de hilar lana y algodón (John Wyatt, carpintero de Lichfield y Lewis Paul, hijo de un exiliado francés).
1760 - 1763	La <i>Society of Arts</i> instituye premios de 40 a 100£ para el mejor invento correspondiente a una máquina de hilar.
1764	Desarrollo en forma casual y sin patentamiento de la máquina de hilar promovida, denominada <i>jenny</i> (James Hargreaves, carpintero en Blackburn).
1768	Patente para hilar hilo de algodón para urdimbre en reemplazo del lino importado (Richard Arkwright, peluquero analfabeto de Preston) y denominada <i>water frame</i> .
1774	Abolición de la ley que prohíbe la fabricación de telas totalmente de algodón.
1779	Desarrollo de la bobina que combina los husos <i>jenny</i> y <i>water frame</i> (Samuel Crompton, de Half-i-th-Wood), denominada <i>mule jenny</i> .
1785	Caduca la patente de 1768 de Arkwright.
4-IV-1785	Patente del telar mecánico (Rvdo. Edmund Cartwright, de Nottinghamshire).
LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL ES UN HECHO.	

Fines del siglo XVII	Empleo del vapor como fuente de energía en un artefacto sin aplicaciones prácticas (Thomas Savery).
1712	Diseño y construcción de la máquina atmosférica de Thomas Newcomen, herrero de Devonshire que se carteaaba con Robert Hooke, secretario de la <i>Royal Society</i> , empleada en la extracción de aguas en minas, con alto consumo de energía.
5-I-1769	Patente de la "máquina de vapor" del empresario James Watt con reducción considerable del consumo de energía.
1781	Patente de la "segunda máquina de Watt", versión optimizada de la anterior en su movimiento mecánico.
POR PRIMERA VEZ EL HOMBRE TRANSFORMA INDUSTRIALMENTE CALOR EN TRABAJO.	

1709	Introducción del coque para producción de arrabio en un alto horno (Abraham Darby, Coalbrookdale).
1783-4	Desarrollo del proceso de pudelado para descarburar arrabio (Henry Cort, empresario siderúrgico y Peter Onions, capataz en una siderúrgica del Merthyr-Tydfil).
EL HIERRO SE LIBERA DEL BOSQUE.	

cerveza y la ginebra) frecuentado por emprendedores sin acceso al club inglés de la alta sociedad.

Lo que resulta más complejo de entender es el porqué de la Revolución Industrial. Hay en tal sentido una explicación sociológica cuyo pionero es Max Weber, que se basó en la ética protestante calvinista, que es bien conocida. Y hay otra, de carácter económico, que debemos a E.A. Wrigley⁽⁴⁾, profesor en la *London School of Economics*, sumamente atractiva y convincente y cuyo eje central es la energía.

En lo económico, la consecuencia fundamental de la Revolución Indus-

trial es que, por primera vez en la historia, se asiste a un crecimiento del producto por encima del demográfico, y ello con carácter sostenido.

Veamos cómo enlaza esto con la etapa que le antecede. Volvamos para ello al modelo energético preindustrial.

Éste es el modelo que ha sido estudiado intensamente por los economistas clásicos, basado en los tres factores de la producción: capital, tierra y trabajo.

Pero ocurre que la tierra es un factor de extensión limitada y, además, sus productos tienen un ciclo de producción (o renovación) fijado por la naturaleza.

Ello genera el conocido efecto de

las utilidades marginales decrecientes que tanto ocupara la atención de Adam Smith, David Ricardo, Malthus o John Stuart Mill.

Este efecto condicionó la visión cultural de la idea de progreso y generó la imagen pesimista del progreso asintótico hacia un techo infranqueable.

En tal sentido, hay que tener en cuenta que, siguiendo la terminología *malthusiana*, las cuatro necesidades básicas a cubrir por el hombre (alimento, vestido, alojamiento y lumbre) provienen del agro. Pero, además, están en competencia entre sí. Una gran demanda de una de ellas va en detrimento de las otras.

La dependencia del agro se evidencia a través de los oficios importantes: hilanderos y tejedores, bataneros y tintoreros, curtidores y tintoreros de cueros, sastres y zapateros, aserraderos, toneleros, carpinteros y ebanistas; todos ellos están sujetos al agro. Las únicas excepciones pueden ser los picapedreros, albañiles, mineros y herreros.

En efecto, no debe olvidarse que, además de la madera como material de construcción, el bosque y el agro eran la fuente de aceites, disolventes, colorantes, adhesivos, cosméticos, resinas, etc.

Como consecuencia, este modelo contiene, en cuanto a estructura de economía de producción, un sistema con retroalimentación negativa que explica y justifica aquella concepción de los economistas clásicos. Precisamente, la única forma de aumentar la productividad se basaba en la especialización de funciones del operario. En la práctica, ello era mucho más probable en la industria manufacturera que en el agro, pero aquella dependía de éste... En tal sentido, es bien conocido el estudio del caso de fabricación de alfileres por Adam Smith, quien llegó a divisar 18 operaciones distintas en su manufactura.

Sin embargo, estos análisis no tenían en cuenta que en Inglaterra entre fines del siglo XVI y comienzos del XIX: **a)** había aumentado la producción agrícola *per cápita*, **b)** se había incrementado el área destinada a pasturas respecto de cultivos y **c)** al escasear la madera como combustible, se había comenzado a emplear carbón

Tabla 1.

Producción de carbón, millones ton/año

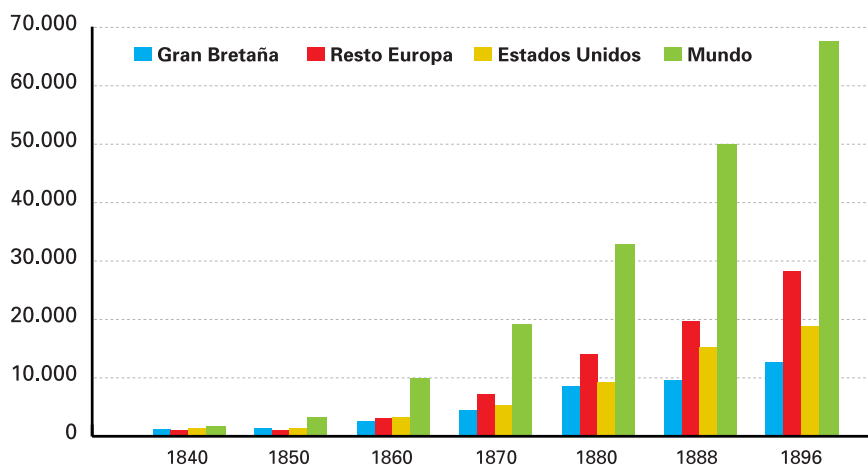
Año	Inglaterra	Resto
1700	2,5-3	0,5 (mundo)
1800	15	3 (Europa)

mineral de afloramientos superficiales próximos a ríos.

El bosque, que cubría ampliamente la energía de la antigüedad, había casi desaparecido.

Ello había traído como consecuencias: **a)** que se dispusiera de mayor capacidad de tracción a sangre animal y de más forraje como alimento animal y combustible, **b)** que se liberara mano de obra del agro para otras funciones (hacia 1800, 4 de cada 10 hombres trabajaba en el agro inglés, mientras que en otros países la proporción era de 6-8 a 10) y **c)** al disponerse de una fuente sustitutiva de energía, se comenzaron a fabricar más ladrillos para la construcción.

Figura 1 • Crecimiento de la capacidad instalada de las máquinas de vapor, miles CV⁽¹⁾



Además, la mayor parte del algodón empleado por la industria textil se importaba de Estados Unidos.

Con todo ello, se rompía el círculo vicioso de los factores en autocompetencia de Malthus.

Así pues, la producción de carbón en Inglaterra era mucho mayor que en otros países.

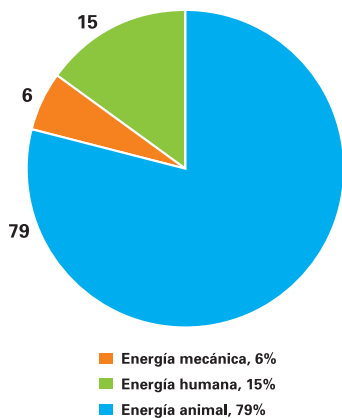
En tanto, Holanda apelaba a la turba

Tabla 2.

Sustitución de ruedas hidráulicas por máquinas a vapor⁽¹⁾.

	Ruedas hidráulicas	Máquinas a vapor
Sheffield, 1794	106	5
Industria textil, Británica, 1839	2230 (28.000 CV)	3051 (74.094 CV)

Figura 2 • Matriz energética en Gran Bretaña, en años previos a la Revolución Industrial ⁽¹⁾



porque no tenía carbón y en el siglo XVII la consumía a razón de 3-5% de sus reservas por década (a ese ritmo, en un siglo y medio se agotaría la mitad de las reservas). Por ello, el “candidato” no podía hacer la Revolución.

Aparece entonces la gran duda: ¿cómo puede una reserva de energía (agotable) competir contra un flujo de energía (renovable)?

Obviamente, lo que por entonces no se computaba era el flujo que era capaz de proveer la reserva frente a lo limitado de éste para el recurso renovable.

Y así entonces aparece un nuevo sistema de producción con realimentación positiva.

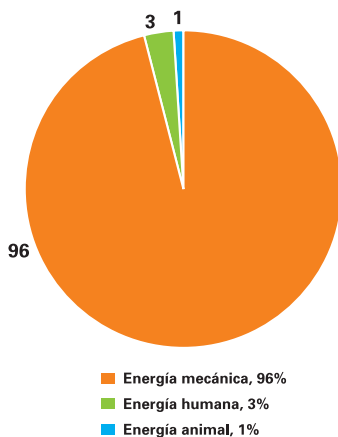
Además de su uso como combustible, el carbón permitió la creciente producción de hierro, que pasó de unos miles de toneladas anuales a millones. Anteriormente, producir una tonelada de hierro implicaba talar una hectárea de bosque. En tanto, 32.000 km de rieles requieren tres millones de toneladas de acero.

Pero, como en todo proceso cultural, la sustitución de un modelo por otro no fue inmediata, como puede apreciarse en la tabla 2, y el crecimiento de las máquinas de vapor fue vertiginoso según se aprecia en la figura 1.

En tanto, las matrices energéticas mostraban lo siguiente, en donde el tamaño no indica volúmenes totales (figura 2 y 3).

Se desarrollan grandes industrias para las que la producción del campo es irrelevante: manufacturas metalúrgicas, máquinas, herramientas, alfarerías, ladrillos, vidrio, cerámica, química inorgánica pesada, astilleros, ve-

Figura 3 • Matriz energética en Gran Bretaña, en años posteriores a la Revolución Industrial



hículos, bienes de consumo durables. Con más energía se multiplica varias veces la cantidad de trabajo por operario. Pero como en todo proceso de cambio, hay mezcla de culturas y técnicas. La forma de extraer el carbón seguía siendo preindustrial y las máquinas que se construían rodeando a la de vapor mantenían la estructura de las de tracción a sangre.

Tal vez por ello, este cambio no atrajo a los economistas clásicos y mentes lúcidas como la de Stuart Mill que decía en 1848 ⁽⁴⁾:

“Puesto que todos los materiales de la manufactura se extraen de la tierra, y muchos de ellos de la agricultura, que en particular abastece todas las materias de la industria textil, la ley general de la producción de la tierra, la ley de los rendimientos decrecientes, debe ser aplicable, en última instancia, a la historia de la manufactura como lo es a la historia de la agricultura. A medida que la población crece

se fuerza más y más la capacidad de la tierra para dar un mayor producto; cualquier oferta adicional de materias y de alimentos se debe obtener con una inversión de trabajo que aumenta de forma desproporcionada”.

Pero algunos ya habían percibido el cambio como lo atestigua el científico William Browing quien, al visitar en 1750 la zona minera cercana a Whitehaven, decía ⁽⁴⁾:

“Se necesitarían unos 500 hombres, o una fuerza igual a la de 110 caballos para hacer funcionar las bombas de una de las mayores máquinas de vapor (máquinas de calor) que se usan hoy en día... Se puede sacar tanta agua con una máquina de este tamaño, haciéndola trabajar de forma constante, como la que podrían sacar 2520 hombres con cubos y tornos, a la manera de muchas minas en la actualidad, o como la que podrían transportar sobre la espalda un número doble de trabajadores, como se hace, según dicen, en algunas de las minas en Perú”.

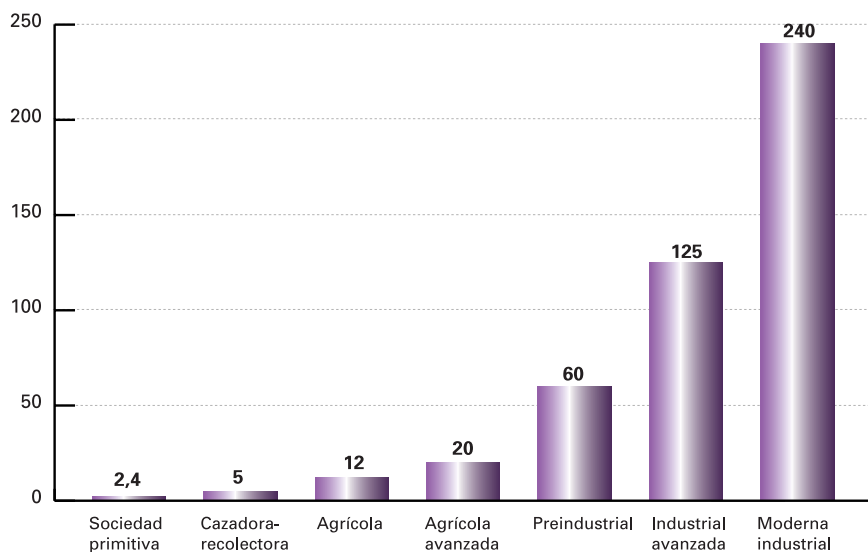
Después del carbón viene el gas de hulla empleado en alumbrado y en motores, y luego el petróleo.

Como acotación al margen, resulta interesante observar que el uso inicial de los portadores energéticos (petróleo, gas de hulla, electricidad) fue la iluminación. Más tarde llegó el usufructo mecánico.

Modelo energético industrial avanzado

Este modelo es hijo del petróleo que da forma y estructura el mundo donde vivimos.

Figura 4 • Consumo de energía y evolución, miles kcal/persona/día ⁽²⁾



Este universo es bien conocido por todos nosotros de modo que vamos a terminar nuestra presentación con el gráfico con el que la comenzamos.

Dicho gráfico contiene la información de la figura 4.

En este gráfico se observa que, desde la sociedad primitiva Preneolítica hasta la moderna industrializada, el consumo energético ha aumentado 100 veces.

Ello es fácil de comprender si, por ejemplo, consideramos que una ciudad de un millón de habitantes demanda diariamente más de 1800 toneladas de alimentos, 567.000 toneladas de agua dulce y 8600 toneladas de combustible, y que todo ello es posible mayoritariamente gracias al petróleo.

En tanto, del consumo alimentario (mantenido prácticamente constante) hemos dicho que un 20% (una quinta parte) se utiliza como energía mecánica. Por lo tanto, el equivalente en tracción a sangre de este incremento de consumo energético es del orden de 500 individuos.

La energía de la tracción a sangre de estas 500 personas es hoy aportada fundamentalmente por la que brindan los recursos fósiles.

Aceptemos que un asalariado expresa su contraprestación laboral en calorías (480 kcal/día). Si, como tal, percibe 1.000 US\$/mes para una contraprestación de ocho horas diarias, 22 días al mes, ello significa que su costo horario es de: (1000 US\$/mes) · (22 días/mes)

x (8 horas/día) = 5,7 US\$/h.

A su vez, este empleado aporta como energía mecánica el 20% de su consumo energético alimentario, esto es: (480 kcal/d) · (24 hs/día) = 20 kcal/h.

Ello significa que su costo laboral energético es de (5,7 US\$/h) · (20 kcal/h) = 0,28 US\$/kcal, o bien (0,28 US\$/kcal) · (0,00116 kWh/kcal) = 246 US\$/kWh.

Por otro lado, a un precio de la energía fósil de 20 US\$/bbl pe, tendríamos 20 US\$/bbl pe x 7 bbl pe/ton · (10⁶ kcal/ton) = 1,4 x 10⁴ US\$/kcal.

Por lo tanto, la energía fósil genera un ahorro de 0,28 / 1,4 x 10⁴ = 2000 veces.

Ésta es la causa, razón de ser y explicación del rol de la energía fósil en los últimos dos siglos y medio en la vida del hombre.


Pero además, agreguemos a ello otro elemento. En efecto, hasta acá nuestro enfoque fue a través de la energía.

El carbón inauguró la era de los productos industriales orgánicos sintéticos vía la carboquímica (colorantes, fármacos, explosivos, gasolina y plásticos) que hicieron grande la colosal industria química alemana del siglo XIX y primera mitad del siglo XX. Y desde mediados del siglo pasado, tenemos la petroquímica, que domina el paisaje de nuestros productos químicos y materiales.

A ello debemos agregar la versatilidad del petróleo a la hora de generar combustibles que alimenten, tanto

aviones, como barcos, automóviles, tractores, calderas o centrales térmicas.

Menuda tarea la de los que piensan en su sustituto.

La Revolución Industrial impuso una única nueva fuente de energía primaria que hoy domina el panorama. De una cosa estamos convencidos: la sustitución será difícil y no vendrá de una sola fuente. Serán varias y habrá que construir un mundo nuevo, acorde con ellas. 

Roberto Cunningham es doctor en Química, egresado de la Universidad Nacional de La Plata y se desempeña como director general del IAPG. Es, además, profesor titular de Industrias Químicas en la UNLP y autor de varios libros en su especialidad. Ha realizado trabajos técnicos, cursos y conferencias en nuestro país y el exterior.

Referencias

1. Cipolla, Carlo M., *Historia Económica de la Población Mundial*, Ed. Crítica, Barcelona, 6ª Edición, 1972.
2. Tyler Miller, Jr. G., *Ecología y medio ambiente*, Grupo Editorial Iberoamericana, México, 1994.
3. White, L.A., *The Energy Theory of Cultural Development*, Ed. KM Kapadia, Bombay, 1954.
4. Wrigley, E.A., *Cambio, continuidad y azar*, Ed. Crítica, Barcelona, 1993.