

LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO (TRE): UN CONCEPTO TAN IMPORTANTE COMO EVASIVO

“Hacer un pan como unas hostias”

“Matar moscas a cañonazos”

Refranes españoles que ejemplifican acciones
que puede no merecer la pena llevar a cabo

INTRODUCCIÓN

La energía o el esfuerzo humano que cuesta poner una cierta cantidad de energía a disposición de un usuario, que en el fondo no es sino consumo de energía, determina el rendimiento o eficiencia del proceso que se quiere llevar a cabo.

El cociente entre la energía obtenida y la utilizada para obtenerla, es lo que se denomina Tasa de Retorno Energético (TRE) o en inglés Energy Return on Energy Invested (EROI ó EROEI).

Aunque tiene muchas definiciones, la tasa de retorno energético definida por quien se reclama el inventor del concepto, el profesor Charles A. S. Hall es:

$$\text{TRE} = \frac{\text{Energía entregada a la sociedad}}{\text{Energía depositada en esa actividad}}$$

Que es, más o menos, el cociente entre la energía que se obtiene libre para un fin y la que se emplea para obtener dicha energía.

La energía es, en definitiva, la capacidad para realizar un trabajo. El ser humano es la referencia antropocéntrica por excelencia. Por tanto, si la energía la consume directamente el ser humano, solemos decir que el trabajo que realiza es la energía que gasta o consume en realizarlo.

Hasta ahora, y sólo desde la vigencia de la civilización industrial, no resultaban importantes las consideraciones y análisis sobre la energía neta que quedaba al final para realizar un trabajo, ya descontada la energía que se había consumido en el camino, cuando había mecanismos de consumo e intermediación, tales como máquinas. El sentido común, un sentido hoy casi atrofiado, la intuición o la experiencia en las sociedades no complejas, ponía enseguida las cosas en su sitio.

Si el cociente ER/EI, esto es, la energía obtenida, dividida por la energía consumida en obtenerla no resultaba rentable, es algo que enseguida se veía; era evidente, inmediato.

Obviamente, el cociente jamás podrá ser inferior a la unidad, en un proceso que se desee sostenible o sustentable.

Charles Hall, profesor de la Universidad del Estado de Nueva York y autor de numerosos libros y artículos sobre este asunto, presentó una ponencia en la V Conferencia Internacional de ASPO, el pasado 19 de julio en Pisa, Italia. Se titulaba “EROI: The Key Variable in Assessing Alternative Energy Futures and a First Estimate of Energy Return on Investment for Global Petroleum”. (La Tasa de Retorno Energética o TRE: una variable clave para valorar el futuro energético alternativo y una primera estimación de la TRE para el petróleo mundial). La presentación original puede encontrarse en la página de ASPO: http://www.aspoitalia.net/images/stories/aspo5presentations/Hall_ASPO5.pdf). Una traducción al castellano de la misma puede descargarse desde la página de Crisis Energética (http://www.crisisenergetica.org/ficheros/TRE_charles_hall_aspo2006.pdf).

En ella, con tanto humor como simplicidad, presentaba de forma muy intuitiva a un indio persiguiendo a un conejo y explicaba que esa persona, para poder vivir (de forma sostenible) estaba obligado a obtener más energía de su presa que la que gastaba para atraparla. Después, ponía al indio montado en un bólide realizando la misma tarea. Con ello, venía a decir, que mediante el uso de energía exógena, esto es, externa al cuerpo, se puede sobrevivir (temporalmente y mientras dure esa fuente, claro está) con un EROEI inferior a la unidad, en lo tocante a la caza del conejo.

En el fondo y simplificando, todo ser vivo en la naturaleza está diciendo, con su simple presencia, que pertenece a una especie con la TRE superior a la unidad.

Charles Hall consideró que una TRE aceptable para un sistema energético, debería estar por encima de 5. Quiere decir, que debería ser capaz de obtener de forma estable del entorno unas 5 unidades energéticas por cada unidad de energía consumida en su obtención.

Como veremos más adelante, posiblemente el profesor de Nueva York esté en lo cierto.

Es posible que haya especies vegetales capaces de sobrevivir con una TRE ligeramente superior a la unidad, siendo la unidad la cantidad de energía del numerador disponible que garantiza su propia existencia como individuo y el extra que necesite para el proceso de reproducción, que también cuesta esfuerzo (energía) y es exigible para el mantenimiento de la especie. Esta cantidad está relacionada, muy directamente, con la que se obtiene de forma directa del sol y que permite la función vital de la fotosíntesis.

Por el contrario, los animales herbívoros del principio de la cadena trófica, si viven de capturar y transformar en su provecho la energía de las plantas quizá puedan sobrevivir con una TRE de entre algo más que dos y hasta 3 ó 4; algo necesariamente un escalón superior a la TRE mínima que necesita una planta de la que se alimente. Ahí debe estar siempre la energía necesaria para asegurar la reproducción y la existencia de la especie, que cuando está a nuestra vista, es sinónimo de éxito en el tiempo.

En el aumento de la complejidad de las transformaciones, y subiendo por la cadena trófica, seguramente el hombre primitivo anterior al uso del fuego pudo sobrevivir como especie con TRE's entre algo más que 3 y hasta 4 ó 5, en función de la complejidad de sus capturas, la abundancia de las mismas y el esfuerzo que debe realizar para proveerse de ellas. Los carnívoros, al utilizar herbívoros para su alimentación, están también

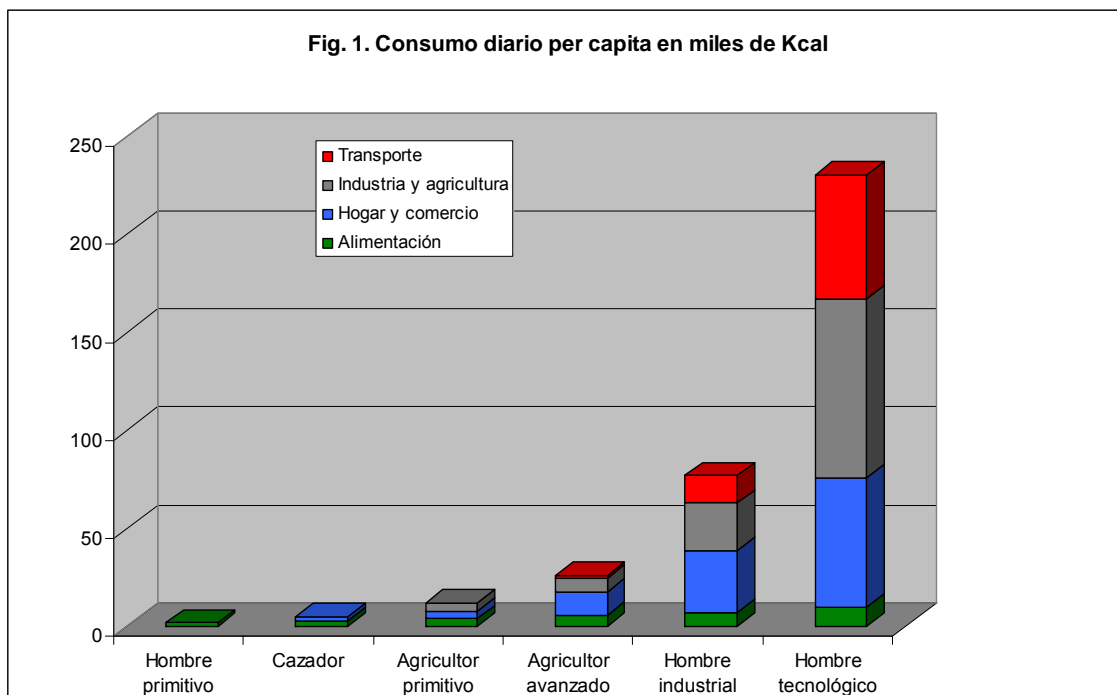
aumentando, condensando, su fuente de ingreso energético; aumentando el numerador de la energía obtenida, frente al denominador de la energía empleada para obtenerla.

En la cúspide de la pirámide de esta cadena, aparece el hombre; esa maravillosa máquina cuyo metabolismo se conforma y puede mantenerse estrictamente con unas 3.500 kilocalorías diarias de promedio de ingesta, suponiendo que viva en lugar templado y soleado y se excluya de su dieta la toma directa de sol. De esta forma, la existencia del complicado rey de la creación, en su forma menos evolucionada, quizá como cazador recolector, está indicando que demanda y obtiene con éxito del entorno una TRE de entre algo más de 3 y entre 4 y 5, si se reduce todo a la energía base, a la energía primaria que se obtiene siempre del sol.

Hasta aquí una pequeña historia energética de los seres vivos y su evolución, basada exclusivamente en la energía endosomática que les permite vivir y reproducirse.

Prometeo fue el primero que se atrevió a dar el salto en la utilización de la energía externa, que denominamos exosomática (externa a la que el cuerpo necesita para su ingesta pura y dura), robando el fuego a los dioses. Los griegos ya debatían con fervor y entusiasmo sobre estos temas importantes.

Earl Cook, en su famoso artículo publicado en Investigación y Ciencia en septiembre de 1971, titulado “The Flow of Energy in an Industrial Society”, describía el consumo diario de energía a lo largo del tiempo, de la siguiente forma:

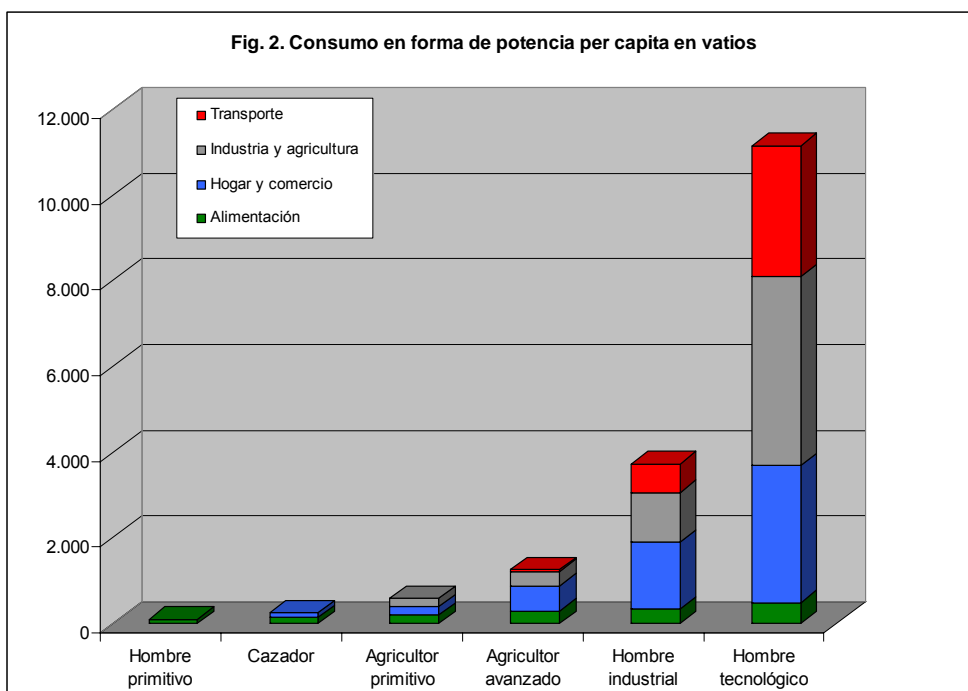


Si se pudiese simplificar, lo que Earl Cook trataba de explicar es que el hombre primitivo es el mono desnudo de antes de conocer el fuego. El cazador (recolector), sería así el hombre que ya domina el fuego. El agricultor primitivo sería el que comienza de forma incipiente a utilizar la fuerza (energía) de animales domesticados en su beneficio y la que le proporcionan los cultivos al iniciar la agricultura. El hombre

industrial puede ser el del siglo de las luces, aunque haya hoy grandes masas de población humana por debajo de ese nivel. Y el hombre tecnológico es el que hizo posible la conquista de la Luna.

Una vez que Prometeo abrió esa caja de Pandora, el camino hacia un aumento incesante de la TRE, su ascenso a esa cúspide y su posiblemente inevitable y posterior declive, estaba marcado para siempre. Los griegos siempre han sido muy imaginativos para explicar mediante mitos y de forma sencilla verdades como puños, aprehendidas mediante la simple observación de la naturaleza.

También se puede ver el gráfico como la potencia promedio que utiliza el hombre en cada uno de esos estadios. Y si se da en forma de vatios de potencia promedio, el concepto queda más claro que el de las calorías (más asociado a la alimentación, que hoy es una ínfima parte de su consumo). La gráfica sería la siguiente:



Una guía explicaba en una visita turística a una casa colonial española del siglo XVII en el actual Buenos Aires, que los dueños de la casa consideraban que el equilibrio ideal para el mantenimiento doméstico consistía en disponer de aproximadamente un siervo por cada miembro libre de la familia. Indudablemente, se estaban apropiando de una energía externa (aparte de la de los animales de tiro y del fuego), para aumentar su confort. Este ya estaría más cerca de una TRE de 5 o algo superior, que mencionaba el profesor Hall.

A partir de esa tasa de retorno energético o TRE, las cosas se complican a medida que sube la TRE, por una mayor disponibilidad del recurso energético, frente al coste energético que representa obtenerlo. Y como a medida que la sociedad humana se hace más compleja, aumenta el número de transformaciones que sufre la materia y también las formas en que se dispone de la energía, cada vez resulta más complicado homogeneizar el conjunto de la energía que un individuo o grupo humano perteneciente a un determinado estadio social acapara o consume para acapararla.

UNA TRE CAMBIANTE CON EL TIEMPO Y LAS CIRCUNSTANCIAS

La TRE podría subir, pero su aumento empezaba a no ser una relación directa con el aumento del consumo. De hecho la TRE es un concepto que siempre es cambiante con el tiempo y el medio en el que se desenvuelve y con los que se desenvuelve la evolución humana.

Un cazador recolector que domina el medio y se multiplica y utiliza leña del medio y caza animales, tiene una TRE positiva, mientras dura su forma de vida, y la prueba inequívoca es la subsistencia misma de su progenie. Es la mejor huella o marca de que ha tenido éxito mientras ha existido en periodos razonablemente largos de tiempo; en periodos históricos o incluso en eras. Pero si los cazaderos se agotaban y tenía que ocupar terrenos de otro grupo de cazadores recolectores u otra zona menos fértil, las luchas entre grupos humanos o la escasez, bien podían hacer disminuir el aporte neto de energía y por tanto, la energía excedentaria para usos lúdicos no vinculados estrictamente a la supervivencia (mantenimiento de sus funciones metabólicas y reproductivas).

Igualmente, la captura de esclavos podía suponer una ventaja en ciertos niveles y situaciones, pero también podía representar, si se daba una carga excesiva de ellos, un inconveniente peligroso, que podía llevar a una disminución brusca de la TRE del grupo dominante, por la energía desplegada en el esfuerzo militar para mantener los esclavos a raya.

Los agricultores primitivos, incluso hasta hace muy poco, sabían perfectamente que en una sociedad preindustrial, o agrícola avanzada, tal y como la describe Earl Cook, tenían que cultivar, en las zonas de la cuenca Mediterránea, aproximadamente un 20% de sus tierras para alimentación del ganado, aparte de pastos y barbechos. Eso daba una TRE de aproximadamente 5, para un agricultor independiente, sin amo y con tierras. El terrateniente, utilizaba a agricultores y ganaderos sin tierra en su propio provecho y así podía aumentar su TRE, respecto del pequeño agricultor independiente. Si la explotación era demasiado dura para el agricultor sin tierra, las revueltas estaban aseguradas y de esta forma, la TRE del terrateniente podía disminuir, aunque consiguiera reprimirlas momentáneamente, por el esfuerzo opresor. Si ese esfuerzo trataba de repercutirlo sobre las gentes explotadas, entraba en un círculo vicioso de represión, que le llevaba finalmente al debilitamiento y a la caída, aunque pudiese llevarse por delante a muchos campesinos. Los agricultores buenos, lo mismo que los amos buenos, si es que se puede emplear esta expresión en la relación amo-esclavo, siempre han sabido los niveles óptimos de explotación de sus animales o siervos o esclavos, de la fuerza ajena, utilizados en su beneficio. Estaba en su propio interés, si eran inteligentes, garantizar a animales y a siervos los mínimos energéticos (en aquellos tiempos, los mínimos alimenticios y de albergue) para su adecuado funcionamiento metabólico, que debía incluir el derecho a la reproducción. Puede parecer cruel, pero era una simple ecuación termodinámica. Mantenía mejor y durante más tiempo el nivel de una TRE alta el que entendía mejor estas ecuaciones.

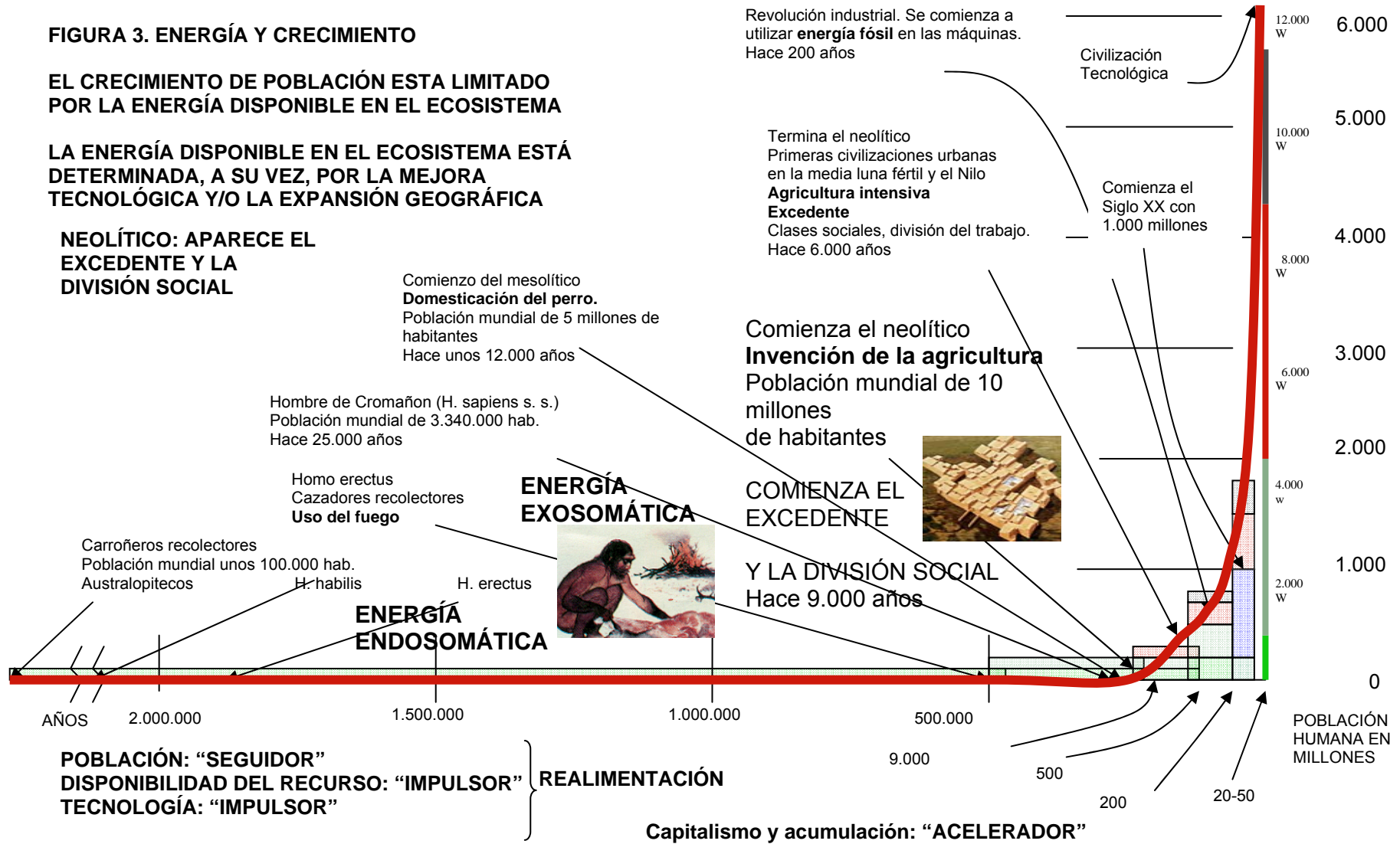
Lo que solía delimitar e ir haciendo variar la TRE era, por un lado, el descubrimiento de alguna técnica de captación externa de nueva energía.

FIGURA 3. ENERGÍA Y CRECIMIENTO

EL CRECIMIENTO DE POBLACIÓN ESTA LIMITADO POR LA ENERGÍA DISPONIBLE EN EL ECOSISTEMA

LA ENERGÍA DISPONIBLE EN EL ECOSISTEMA ESTÁ DETERMINADA, A SU VEZ, POR LA MEJORA TECNOLÓGICA Y/O LA EXPANSIÓN GEOGRÁFICA

NEOLÍTICO: APARECE EL EXCEDENTE Y LA DIVISIÓN SOCIAL



Fuente: Fernando Ballenilla. El final del petróleo y elaboración propia

Al igual que Earl Cook, la figura 3, representada con el eje del tiempo sobre este tipo de evolución y marcando los principales hitos que han movido a la humanidad a ir dando saltos hacia delante, tomada del profesor Fernando Ballenilla¹, da una idea mucho más clara de los tiempos de la evolución humana. Y nos hace reflexionar sobre el vértigo del crecimiento exponencial desde que el hombre penetra desde la biosfera, su dominio de siempre, limitado y precioso, a las entrañas de la litosfera; cuando escarba en la corteza terrestre en busca de minerales energéticos, seguramente más por necesidad que por ingenio. O más bien porque la necesidad sea la madre del ingenio.

Un estable hombre primitivo

Eran tiempos en los que no era necesario preguntarse por la TRE porque si esta bajaba a la unidad, el individuo y posiblemente su especie estaban muertos. El cálculo de la energía que obtenía del exterior para su alimentación y mantenimiento, exclusivamente endosomática, así como la energía que le costaba obtenerla, eran muy fáciles de calcular, pues sus únicas actividades humanas eran la caza y recolección y la reproducción, aparte de sencillos ejercicios físicos lúdicos en la parte del gasto, que solo podían salir de su propio cuerpo. Los antropólogos pueden todavía hoy calcular con precisión, para esa forma de vida tan primitiva, esas dos variables: la energía obtenida y la consumida en obtenerla, ya que ambas provenían exclusivamente de la alimentación.

Prometeo y la caja de Pandora de la energía exosomática

Con el descubrimiento del fuego, hace 300-500.000 años, comienza el uso de la energía exosomática y se da un salto adelante en la TRE, que dura prácticamente en el tiempo desde el descubrimiento. Todavía sigue siendo relativamente fácil para los antropólogos analizar la tasa de retorno energético para esos grupos humanos, ya que, aunque podían incendiar praderas enteras (los aborígenes australianos lo hicieron hace miles de años y transformaron considerablemente bastantes zonas boscosas), ese aumento del consumo de energía era con cargo a la naturaleza y no revertía necesariamente en beneficio energético extra relevante para su comunidad o sociedad; esto es, no dejaba más energía útil que la que se consumía en hacer un fuego, fuese para cocinar y ablandar un alimento o para quemar una gran pradera y cercar a un animal o una manada. El numerador y denominador de la TRE seguían siendo muy manejables.

Hay antropólogos que explican que ciudades como Babilonia o los imperios maya o inca podían haber colapsado cuando el tamaño de la ciudad y el número de sus habitantes y sus modos de vida, exigían un área de explotación de tal magnitud que el necesario transporte de bienes para las metrópolis excedía de las posibilidades técnicas del momento.

El Neolítico; la acumulación y la división social

Con la domesticación de animales y de cultivos, el hombre se hace sedentario, comienza a disponer de almacenes y los alimentos extra se empiezan a acumular en ellos. Sube la TRE, porque sube la cantidad de energía que un individuo o grupo humano de este modo de civilización es capaz de aportar, respecto de la que le exige la crianza y el cultivo respecto de la caza y la recolección. Sin embargo, comienza a complicarse el

¹ "Agricultura, población y energía", Fernando Ballenilla
(http://www.crisisenergetica.org/staticpages/pdf-rtf/Agricultura_poblacion_energia.zip)

cálculo de dicha TRE, porque el denominador, esto es, la energía invertida en conseguir más energía extra a disposición, que es el factor clave de la TRE, empieza a hacerse más complejo. Ya se hace necesario calcular la energía gastada en crear los almacenes; las murallas de las primeras naciones Estado para defender la acumulación extra de energía en forma de alimentos de las culturas nómadas, vecinas y acechantes en época de escasez. Y el excedente crea división del trabajo, especialización. Comienzan a aparecer castas y clases más complejas que las tribales, que no consumen energía en la búsqueda de energía, porque ya no es su función, hasta ahora una función universal de todo individuo, sino que pueden ser rituales (sacerdotes, etc.) o militares (especialistas en el arte de la guerra), etc. Esto es un gasto energético para esa sociedad, que consume energía del denominador de la TRE y consume energía para mantener la energía del numerador –no para producirla directamente– con su actividad específica y también utiliza la que se obtiene en el numerador.

Así, una sociedad del neolítico, bien organizada, podía generalmente superar, vencer o imponerse a una sociedad de cazadores recolectores, seguramente porque su TRE resultante era superior; esto es, el conjunto de ingresos y gastos energéticos de su sociedad la hacían más competitiva que la de una sociedad nómada de cazadores recolectores. Pero también podía darse el caso de que si agotaban su entonces limitado ámbito de actuación, una población de cazadores recolectores bien estructurada, con menos ingresos y gastos, pero con el balance puntualmente más positivo (una TRE ocasionalmente mayor que la degradada de una sociedad neolítica, de agricultores y ganaderos en declive), pudiese dar fin a la sociedad neolítica vecina más avanzada. Esto podría suceder, bien por ir dejando los campos exhaustos, por salinización de tierras, bien por cualquier causa que su propio éxito hubiese podido inducir, como por ejemplo, un exceso de población para los recursos locales disponibles. Ejemplos hay ya en leyendas y entre culturas de este tipo en fechas en que los historiadores modernos han podido recoger.

La explosión definitiva: hurgando en la litosfera

Hace apenas doscientos años, el avance, lento pero inexorable de las sociedades agrícolas y ganaderas, con una mejora constante de las variedades vegetales y animales (los primeros pasos a la manipulación genética, entonces, por simple selección recurrente) y el perfeccionamiento de las herramientas mecánicas y la continua especialización de los animales de tiro en funciones o aplicaciones concretas, lleva a ir ocupando cada vez extensiones más amplias de las zonas disponibles. La intensificación de las luchas por los recursos disputa las mejoras obtenidas. Éstas van al numerador de las nuevas TRE's que se van obteniendo, y las luchas a aumentar el denominador de la energía que hay que gastar para seguir teniendo energía a disposición.

El numerador se complica algo, pues ya las necesidades no sólo son la alimentación humana, sino el consumo de energía doméstico (por ejemplo, cada vez se van colonizando áreas septentrionales más inhóspitas y eso requiere más insumos energéticos para mantenerse calientes) o bien para usos lúdicos o ceremoniales, siempre en aumento. El transporte, con el desarrollo de la navegación fluvial y marina, aumenta la posibilidad de intercambios cada vez más remotos, que aportan más al numerador, pero que también lastran el denominador de la energía que hay que emplear para llevar un bien desde Gades a Tiro, a cambio de otro de Tiro a Gades. En general se puede decir que la TRE va aumentando, siempre con esos altibajos que suponen el

agotamiento cada vez más rápido de los recursos locales o regionales y las desapariciones por luchas por los recursos allá donde la TRE cae por debajo del mínimo de subsistencia. Los historiadores, no ya solo los antropólogos, observan que vamos cambiando confort y disponibilidad de bienes, de materia transformada a nuestro servicio y en nuestro beneficio, por una mayor complejidad social. Y que perdemos tiempo, que cada vez acucia más, en la consecución de objetivos que antes no existían y perdemos naturaleza, que empieza a pasar de ser un factor dominante y amenazante a ser dominada y esquilada y a estar en peligro, si bien sólo en áreas limitadas hasta entonces.

Luego el carbón y el petróleo y finalmente el gas, la energía hidroeléctrica y la nuclear. Sobre los fósiles, dado su color, el humo que desprenden en la combustión y su origen subterráneo, muchos los han considerado elementos del diablo. Todos ellos tuvieron su origen en la energía del sol a lo largo de mucho tiempo, plasmada en la formación de microorganismos, plantas y animales, de mucha materia orgánica, acumulada durante decenas de millones de años en subsuelos más o menos profundos, en lenta cocción a presiones y temperaturas muy específicas, organizadas por los movimientos geológicos que consiguieron capturarlos en sus pliegues y darles el punto de cocción durante todo ese tiempo. No dejan, por tanto, de ser energía solar acumulada, que tomamos en préstamo para su transformación química inmediata mediante su combustión, deshaciendo el trabajo de millones de años en apenas unos segundos; en apenas lo que el émbolo de un pistón da una vuelta o la boca de una espita quema el gas.

El dios Ra como medida de todas las energías

Y ya metidos en esta muy compleja civilización occidental, que cree ser la única, aunque deja a cuatro quintas partes de la humanidad más bien fuera de ella, las transformaciones de energía han llegado a extremos de paroxismo, que resultan muy difíciles, por no decir imposibles de calcular. El numerador de la TRE sigue estando más o menos claro, ya que se siguen publicando las estadísticas, relativamente fiables, de la energía que se consume y consume proveniente de los distintos tipos de carbón, los distintos tipos de petróleo y del gas. También sabemos la energía que se produce y consume de tipo hidroeléctrico y nuclear. Los contadores eléctricos son muy precisos en este sentido.

El problema ahora es el denominador de las energías que se exigen para poner la energía del denominador a disposición de la Humanidad; las energías empleadas para producir los muy distintos tipos de energía. Son tan complejas y salen desde tantos puntos y van a tantos destinos, que es muy difícil saber cual es la TRE concreta de una actividad, de un grupo humano o de la utilización de algún determinado tipo de combustible a escala local, regional o mundial.

Hoy puede estarse produciendo gas, que se ha explorado con maquinaria que consume derivados varios del petróleo, se ha transportado por gasoductos de acero contruidos en acerías que consumen mezclas de electricidad y carbón y estar consumiéndose en la producción de cristal templado desde el silicio, que irá a componer módulos fotovoltaicos que producirán energía eléctrica para la red nacional.

O bien se puede estar consumiendo electricidad para producir una maquinaria que consumirá petróleo y servirá para transportar e instalar un generador eólico, que a su

vez producirá electricidad, que consumirán en su domicilio los empleados de las empresas que fabrican maquinaria especializada o vehículos para el mantenimiento, o asfaltos para las redes de carreteras que harán posible este juego. Lo que duran las carreteras, su mantenimiento y reposición de asfalto, es algo que depende de muchos tráfico, no sólo del mencionado aquí. Así podrían ponerse miles de ejemplos entrelazados, de forma que hoy día no sabemos bien si estamos produciendo para vivir o vivimos para producir los bienes y la energía que estamos consumiendo. Aunque dado el sistema que fomenta intensamente el consumo, se diría que más bien parece que se trate de la segunda opción.

Por ello, desglosar con criterio ese denominador de la TRE es verdaderamente una tarea compleja. Y por ello, resulta clarividente y fundamental el concepto que Howard T. Odum, un famoso profesor de ingeniería medioambiental de la Universidad de Florida, introduce en los años ochenta del siglo pasado (“Environmental Accounting” o Contabilidad medioambiental), procedente de la composición de “embedded energy” (energía incorporada), sugerida por primera vez por David Scienceman, de Australia. Se trata de conceptos que ayudan a la reducción energética de toda fuente de energía, que puede componerse de diversas fuentes directas o indirectas y llevarlas acumuladas a la fuente de energía primaria por excelencia, que es el sol, y que es fácil de medir y bastante constante (1.365 vatios por metro cuadrado en el espacio exterior de la Tierra).

Ese concepto es el de **energía**, con sus variantes respectivas, definido por Odum de la siguiente forma:

“Energía disponible de un tipo, requerida previamente, de forma directa o indirecta para hacer un producto o realizar un servicio”. Sus unidades serían los emjulios, emkilocalorias, etc.)

El concepto clave aquí es “directa o indirectamente”, porque no cabe duda de que toda fuente de energía disponible en la tierra, incluida la fósil o la nuclear, se puede reducir a energía solar primigenia. Con ello, Odum trataba de verificar la energía que un producto hecho o un servicio realizado contenían en sí mismos. Una suerte de “memoria” de la energía que ese bien contiene; primer paso para poder evaluar científicamente la energía gastada en poseerlo o disfrutarlo.

Aunque la energía se conserva según la primera ley de la termodinámica, según la segunda, la capacidad de la energía para realizar un trabajo se agota y no puede ser reutilizada. Por definición, la energía solar solo se conserva en una cadena de transformaciones hasta que la capacidad de realizar trabajo de la energía final restante se agotada (generalmente en realimentaciones interactivas)².

Y también define otros parámetros para su intento de unificar criterios de medida, tales como

- **Energía disponible**= La energía potencia capaz de realizar un trabajo, mientras se degrada en el proceso (Unidades: kilocalorias, julios, BTUs, etc.)

² Invirtiendo en capital natural (“Investing in Natural Capital”), ISBN 1-55963-316-6 Publicado por la Sociedad Internacional para una Economía Ecológica (“The International Society for Ecological Economics”) e Island Press, 1994. Se puede leer online en <http://dieoff.org/page13.htm>

- **Energía útil**= La energía disponible utilizada para aumentar la producción y eficiencia de un sistema (unidades: julios disponibles, kilocalorías, etc.).
- **Potencia** = Flujo de energía útil por unidad de tiempo (unidades: julios por unidad de tiempo.)
- **Empotencia** = El flujo de emergía por unidad de tiempo (unidades: emjulios por unidad de tiempo).
- **Trabajo** = Un proceso de transformación de la energía del que resulta un cambio de la concentración o la forma de energía.
- **Transformidad** = Es la emergía por un día de energía disponible de un determinado tipo (unidades: emjulio por julio).
- **Emergía solar** = Es la energía solar que se necesita, directa o indirectamente, para hacer un producto o realizar un servicio (unidades: emjulios solares).
- **Empotencia solar** = Es el flujo de emergía solar por unidad de tiempo (unidades: emjulios solares por unidad de tiempo).
- **transformidad solar**: La transformidad solar es la emergía solar que se requiere para realizar un julio de un producto o un servicio. (unidades: el emjulio solar por julio).

De esta forma, Odum pretendía analizar la cualidad (energética) de un producto o servicio, midiendo las emergías por unidad de producto o servicio. Con ello, también podría analizar mejor el valor real (el del capital natural, no el dinerario), que daría directamente la emergía de un producto o servicio y la emergía per capita daría un índice del nivel de vida (no de la calidad de vida).

Finalmente, Odum, dadas las complejidades de nuestra sociedad y su radical transformación de todo bien o servicio en valor monetario, tuvo que aceptar un valor de transformación de energía y dinero, terreno farragoso siempre, con el concepto de emdollars (emdólares), que vendría a ser la emergía por unidad monetaria, entrando en campos de alto riesgo científico. Si bien su intención era ofrecer un valor más consecuente con los bienes naturales, ya que en el mundo actual, dominado por la economía clásica, la riqueza de los recursos naturales es inversamente proporcional a sus costes y precios monetarios, y Odum pretendía con los emdólares justo lo contrario.

La emergía, junto con los conceptos del capital natural y la contabilidad del capital natural fueron así las primeras piedras del edificio que pretendía medir, por primera vez desde que el hombre se da cuenta de que ha construido un artificio social extremadamente complejo, si la realización de una cierta actividad, fuese la creación de un bien, la realización de un servicio o la búsqueda y puesta a punto de nuevas fuentes de energía, basándose en las existentes, merecería la pena o no. Fue el reposo de la TRE.

La espada de Damocles del segundo principio de la Termodinámica, la Tizona de la entropía, siempre sobrevuela estos conceptos. Así, la energía disponible, esto es, la energía con potencial de realizar un trabajo útil que se consume en ese proceso, llamada también “exergía” no deja de ser, en el símil siguiente (tomado a Georgescu-Roegen de **Daly, Cobbs** (1993): Para el Bien Común, Fondo de Cultura Económica) un claro ejemplo de los límites de la física que hoy tantos ignoran:

Considérese un reloj de arena. Es un sistema cerrado en el que no entra ni sale arena. La cantidad de arena en el reloj es constante; la arena ni se

crea ni se destruye en ese reloj. Esta es la analogía de la primera ley de la termodinámica: no hay creación ni destrucción de la materia-energía. Aunque la cantidad de arena en el reloj es constante, su distribución cualitativa está constantemente cambiando: la cavidad inferior se va llenando, mientras la cavidad superior se vacía. Esta es la analogía de la segunda ley de la termodinámica, en la que la entropía (que es la arena de la cavidad inferior) aumenta constantemente. La arena de la cavidad superior (la baja entropía) es capaz de hacer un trabajo mientras cae, como el agua en la parte superior de una catarata. La arena en la cavidad inferior (alta entropía) ha agotado su capacidad de realizar un trabajo. El reloj de arena no puede darse la vuelta: la energía gastada no puede reciclarse, a menos que se emplee más energía en ese reciclaje que la que será desarrollada por la cantidad reciclada. Como se ha explicado antes, tenemos dos fuentes del recurso esencial natural, el solar y el terrestre, y nuestra dependencia ha cambiado de la primera a la segunda.

Del doctor Charles A. S. Hall antes mencionado y Cleveland, clásicos en el estudio de la TRE, traemos un resumen de su trabajo **“La energía y la economía de los EE.UU.: Una perspectiva biofísica**, (Cutler J. Cleveland, Robert Costanza, Charles A. S. Hall y Robert Kaufmann), que se publicó por primera vez en el número 225 de la revista Science (31 de agosto de 1984), porque contribuyen a entender mejor este fatigoso esfuerzo por descubrir y racionalizar el estudio de las energías, de su génesis, disponibilidad, y consumo útil (sobre cuyo concepto también cabría especular en estudio aparte), menos el consumo desperdiciado en obtenerlas:

Entre mediados de los 40 y principios de los 70, la economía norteamericana se comportó generalmente bien. Desde 1973, sin embargo, los indicadores del comportamiento, tales como la productividad laboral, la inflación y las tasas de crecimiento habían sido relativamente decepcionantes y los principales modelos económicos no eran capaces de explicar completamente esta deriva y las causas subyacentes. Puede ayudar a ello, verlo desde una perspectiva teórica que reconozca la importancia de los recursos naturales, especialmente la energía de los combustibles; algunos problemas económicos se pueden entender con más claridad, si se tienen en cuenta los límites físicos que la producción económica tiene.

Bajo esta perspectiva, enfocada sobre los procesos de producción, tales como el proceso económico que eleva el estado organizado de la materia en bienes y servicios de baja entropía. Este proceso exige el uso unidireccional y de un uso único, de combustible de baja entropía que se pierde en forma de calor. La producción es un proceso que implica trabajo y como cualquier proceso que implica trabajo, dependerá de la energía libre disponible. La calidad de los recursos naturales es también importante en este proceso, porque los recursos de menor calidad exigirán siempre más trabajo para transformarlos en los bienes y servicios deseados.

Basados en esta perspectiva biofísica, se presentan y discuten más adelante cuatro hipótesis.

Energía y producción económica

Hipótesis 1: existe un estrecho vínculo entre el uso de combustible y la producción económica y seguirá existiendo en el futuro.

Más que ver la economía como un sistema cerrado, debe ser vista como un sistema abierto, incluido en un sistema global mayor que depende de la energía solar. El sistema global produce servicios medioambientales, comestibles y combustibles fósiles y nucleares, todos los cuales provienen de la energía y radiación solar, en conjunto con otros importantes recursos. La economía humana utiliza los fósiles y otros combustibles para reforzar el trabajo y producir capital. El combustible, el capital y el trabajo se utilizan después para transformar los recursos naturales y producir bienes y servicios. La producción es un proceso que utiliza la energía para añadir orden a la materia. Puesto que los combustibles varían en la cantidad de trabajo que pueden llevar a cabo por unidad calorífica equivalente, es importante cuantificar y cualificar el combustible para determinar los niveles de producción económica. Una calidad importante de los combustibles es la cantidad de energía que se requiere para localizar, extraer y refinar el combustible hasta un estado útil para la sociedad. Esto se puede medir mediante el Retorno de la Inversión de la Energía del Combustible (Fuel's Energy Return on Investment ó EROI, también conocida como EROEI –Energy Return on Energy Invested, en inglés), que es la relación entre el combustible bruto extraído y la energía económica que se necesita directa o indirectamente para dejar el combustible en una forma útil.

La teoría económica tradicional ve al combustible y a la energía simplemente como uno más de los insumos, que es completamente reemplazable por otros, pero esto es incorrecto. La energía libre mejora y organiza todos los otros insumos y es un complemento en el proceso de producción que no puede ser creado mediante la combinación de otros factores de la producción. La cantidad específica de energía que se necesita para producir los bienes y servicios se denomina energía incorporada.

Si se consideran los últimos cien años de la experiencia de los EE.UU., el uso del combustible y la producción económica están muy correlacionadas. Una medida importante del rendimiento del combustible es la relación del uso de la energía con el Producto Interior Bruto (PIB) (Gross National Product, o GNP, en inglés), esto es, E/GNP. La relación E/GNP ha caído un 42% desde 1929. Vemos que la mejora del rendimiento energético se debe principalmente a tres factores: (1) El cambio a combustibles de mayor calidad, tales como el petróleo y la electricidad primaria; (2) los cambios en el uso de la energía entre el sector de la vivienda y otros sectores y (3) los mayores precios de los

combustibles. La calidad de la energía es, con mucho, el factor dominante.

Productividad laboral y cambio técnico.

Hipótesis 2: Una gran parte del incremento de la productividad laboral de los últimos 70 años es consecuencia del aumento de la capacidad del trabajo humano de realizar trabajos físicos, dotando a los trabajadores de cantidades crecientes de combustible, tanto de forma directa, como incorporadas en el equipo de capital industrial y en la tecnología.

Los modelos económicos presentan generalmente los avances tecnológicos como un medio para incrementar el trabajo y la productividad del capital. Esos efectos en el cambio tecnológico, son considerados residuales, después de contabilizar todos los factores tangibles: la energía y los recursos naturales no se consideran factores tangibles, dejando así un gran resto. Desde un punto de vista energético, sin embargo, los aumentos en la productividad laboral están movidos realmente por el aumento del uso del combustible por trabajador-hora. En el periodo previo a 1973, cuando los precios de los combustibles caían en relación con el precio del trabajo (la relación salarial), la productividad laboral crecía a medida que el combustible iba siendo reemplazado por el trabajo, debido al cambio relativo de precios. En el periodo posterior a 1973, según el precio del combustible se elevaba respecto de los salarios, los datos señalaban un decremento de la productividad laboral.

Energía e inflación

Hipótesis 3: el coste físico creciente y real para la obtención de energía y otros recursos del medio ambiente es un factor importante que causa inflación.

Las altas tasas de inflación se pueden explicar por los vínculos entre la utilización de combustible y el aporte de dinero. Si se incrementa el dinero, estimulando la demanda más allá de los niveles que se pueden satisfacer con los suministros existentes, los precios aumentarán. esto implica que cuando los costes de obtención de combustible son altos, las políticas fiscales y monetarias pueden no tener éxito a la hora de estimular el crecimiento económico.

Costes de energía y cambio tecnológico

Hipótesis 4: los costes energéticos de localizar, extraer y refinar el petróleo y otras fuentes del medio ambiente se han incrementado y continuarán haciéndolo, a pesar de las mejoras técnicas en el sector extractivo.

Se ha argumentado que las innovaciones tecnológicas en la minería de minerales de bajo grado, puede solucionar el problema asociado con el

agotamiento de los depósitos de minerales de alta calidad. Existe evidencia de esto en la continua disminución de los insumos utilizados por unidad producida en el sector extractivo a lo largo de este siglo.

Desde una perspectiva física, sin embargo, esta vehemente perspectiva del agotamiento y de la escasez de importantes fuentes de recursos naturales no está garantizada. La extracción de minerales de baja calidad exige la utilización de capital y trabajo muy intensivos en energía. En las últimas décadas ha habido un aumento en los insumos directos de combustible por unidad producida de combustibles y minerales. Los costes crecientes de energía para la extracción de combustible, no presagian nada bueno para las futuras explotaciones de los recursos no renovables.

el EROI del gas natural, del petróleo y del carbón han caído dramáticamente a lo largo del tiempo en la parte continental de los EE.UU. En Louisiana, el EROI del gas natural ha caído de 100:1 en 1970 a 12:1 en 1981 y un declive similar se ha observado en la industria petrolífera. A nivel nacional, el EROI del carbón ha caído de 80:1 en los años 60 a 30:1 en 1977. Otro indicador del incremento de coste de la extracción de combustible es el aumento, en dólares constantes, de la cuota del sector minero en el GNP (PIB), desde el 3-4% la mayor parte de este siglo, a cerca del 10% en 1982. El crecimiento económico continuado depende de nuestra capacidad de desarrollar fuentes de energía con un EROI más favorable.

Conclusión

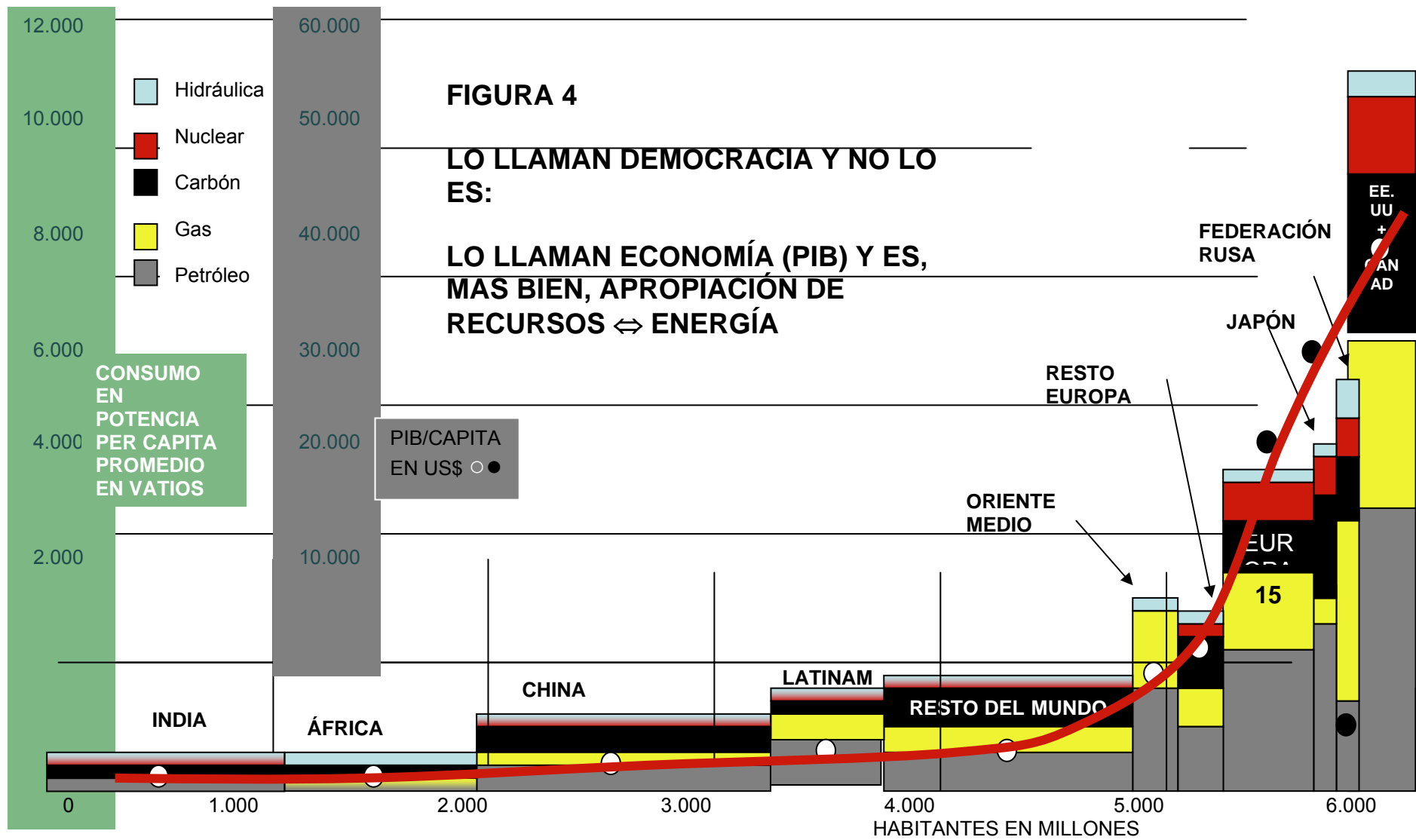
El EROI decreciente de los combustibles y los crecientes costes de la energía para los recursos no combustibles, tendrán un impacto negativo en el crecimiento económico, en la productividad, la inflación y el cambio tecnológico. Para mantener los niveles actuales de crecimiento económico y productividad, necesitamos o desarrollar tecnologías de combustibles con un EROI comparable al del petróleo en la actualidad o aumentar la eficiencia del uso del combustible para la misma producción económica
#1

*#1. Nota del autor: los análisis empíricos en este artículo se han enriquecido y actualizado. Una década más de información, conlleva a las mismas conclusiones del artículo. El lector interesado puede recurrir a Robert K. Kaufmann “Una análisis biofísico de la relación energía/PIB” (“A biophysical Analysis of the Energy/GDP ratio”) *Ecological Economics* 6 (July 1992): 35-36; y Robert K. Kaufmann “La relación entre el producto marginal y el precio: un análisis de los mercados de la energía” (“The Relation Between Marginal Product and Price: An Analysis of Energy Markets”), *Energy Economics* 16 (1994) (págs. 211-214).*

Así pues, parece evidente, que en el carácter global de las economías, sí existe una relación bastante directa entre la economía clásica, en concreto el PIB y el consumo de energía realizado, como se muestra en la figura 4 más abajo. Y eso pesar de los

esfuerzos de la economía clásica por controlar y camuflar el valor del capital natural con capitales dinerarios fluctuantes y pérdidas de valor mediante procesos inflacionarios, más o menos bajo el control de los que dominan el sector.

Sin embargo, esa relación, muy directa, sigue sin enseñarnos si estamos yendo a reducciones de la TRE más o menos aceleradas, por la necesidad de ir invirtiendo cada vez más energía en realizar los mismos procesos, sobre todo, en el campo de la generación misma de la energía, debido a que, históricamente, se han aprovechado primero los recursos energéticos con mayores índices de TRE.



En cuanto a ese preocupante aspecto del agotamiento de un recurso finito, sobre todo del combustible, con el paso del tiempo y la intensidad de la explotación de la fuente, y lo que supone de caída inexorable de la tasa de retorno energético o TRE, sirva la descripción que da el propio Charles Hall en la presentación que hizo en Pisa y que acompañamos a este artículo (diapositivas 12 sobre la TRE de las principales fuentes de energía en los EE.UU. con el paso del tiempo, la diapositiva 37, con el famoso gráfico sobre las tendencias decadentes de la TRE, según los diversos escenarios y sobre todo, la diapositiva 38, con las proyecciones a un futuro amenazadoramente corto, sobre los estudios de Laherrere, la British Petroleum y John S. Herold Inc.)

De ser ciertas, tendríamos el tiempo medido hasta llegar a tasas de retorno energético inviábiles para el mantenimiento de la forma de vida actual, muy posiblemente mucho antes de caer por debajo de la barrera de una TRE de 5, considerada por los expertos como el nivel mínimo de sustentabilidad o sostenibilidad de la sociedad humana.

Ello es así, porque como dice el refrán, nunca segundas partes fueron buenas y si en culturas ancestrales y primitivas de cazadores recolectores o agricultores y ganaderos, fuesen de tipo primitivo o modernos, la naturaleza no estaba tan desgastada, tan contaminada, agotada exhausta como ahora, también los niveles de población eran de otra escala y las formas de vida urbanas no permiten vueltas atrás con sencillez a los niveles que un día fueron suficientes.

A continuación y como colofón se describen las TRE's de las distintas fuentes energéticas, según las ofrece la página web www.eroei.com, con todas las salvedades y generalidades que se deseen, tomadas de la misma fuente: Cleveland, Costanza, Hall y Kaufmann:

Tabla 1.

No renovables	
Petróleo y gas (en la cabeza del pozo)	
1940's	Descubrimientos > 100,0
1970's	Producción 23,0, descubrimientos 8,0
Carbón (en la bocamina)	
1950's	80
1970's	30
Esquistos o pizarras bituminosas	0,7 a 13,3
Licuefacción del carbón	0,5 a 8,2
Gas con presión geológica	1,0 a 5,0
Renovables	
Etanol (de la caña de azúcar)	0,8 a 1,7
Etanol (del maíz)	1,3
Etanol (de residuos de maíz)	0,7 a 1,8
Metanol (de la madera)	2,6
Calor del sol (como apoyo fósil)	
<i>Colector de panel plano</i>	1,9
<i>Colector de concentración</i>	1,6
Producción eléctrica	
Carbón	
<i>Promedio estadounidense</i>	9,0 (27,0)
<i>Carbón superficial Occidental</i>	
<i>Sin lechos de fluido</i>	6,0 (18,0)
<i>Con lechos de fluido</i>	2,5 (7,5)
Hidroeléctrica	11,2 (33,6)
Nuclear (reactor de agua ligera)	4,0 (12,0)
Solar	
<i>Satélite</i>	2,0 (6,0)
<i>torre solar</i>	4,2 (12,6)
<i>Fotovoltaica</i>	1,7 (5,1) a 10,0 (30,0)
Geotérmica	
<i>Predominantemente líquida</i>	4,0 (12,0)
<i>Roca seca caliente</i>	1,9 (5,7) a 13,0 (39,0)

En resumen, están llegando tiempos en que deberemos empezar a preguntarnos, cada vez más seriamente si estamos obligados a seguir matando moscas a cañonazos cada vez más grandes o si merece la pena ponerse a hacer panes como hostias. O si por el contrario, ha llegado la hora de ponerse a no hacer nada.

La cuestión más vital de todas, en esta ardua tarea de averiguar la TRE y analizar sus impactos, no llega a ser tanto la TRE precisa de un combustible fósil en un momento determinado y en un contexto local, nacional, regional o mundial, como si el sistema aguantará igualmente las bajadas en la disponibilidad del recurso, como alegremente viajó cuesta arriba por los aumentos de consumo y de TRE al descubrir nuevas y poderosas fuentes. En este caso operaría en forma inversa el refrán popular español que dice que “para las cuestas arriba te quiero burro, que las cuestas abajo yo me las subo” y lo que va a resultar penoso es el análisis de la cuesta abajo.

Veamos pues, un ejemplo sencillo y esquemático de las últimas décadas de supuesto progreso y crecimiento y suponiendo que los datos de Cleveland y Hall son más o menos correctos:

Supongamos el consumo de petróleo de los EE.UU. desde el año 70, con los datos públicos de BP:

Si las TRE's del petróleo nacional y del importado han ido cayendo, aunque a diferentes ritmos (más el local, por agotarse más y antes) y se estiman en caída más o menos lineal, respecto de los datos de Charles Hall, se puede trazar una TRE aproximada y simplificada de la mezcla de petróleo nacional e importado, que también va disminuyendo poco a poco, tal y como se muestra en la figura 5

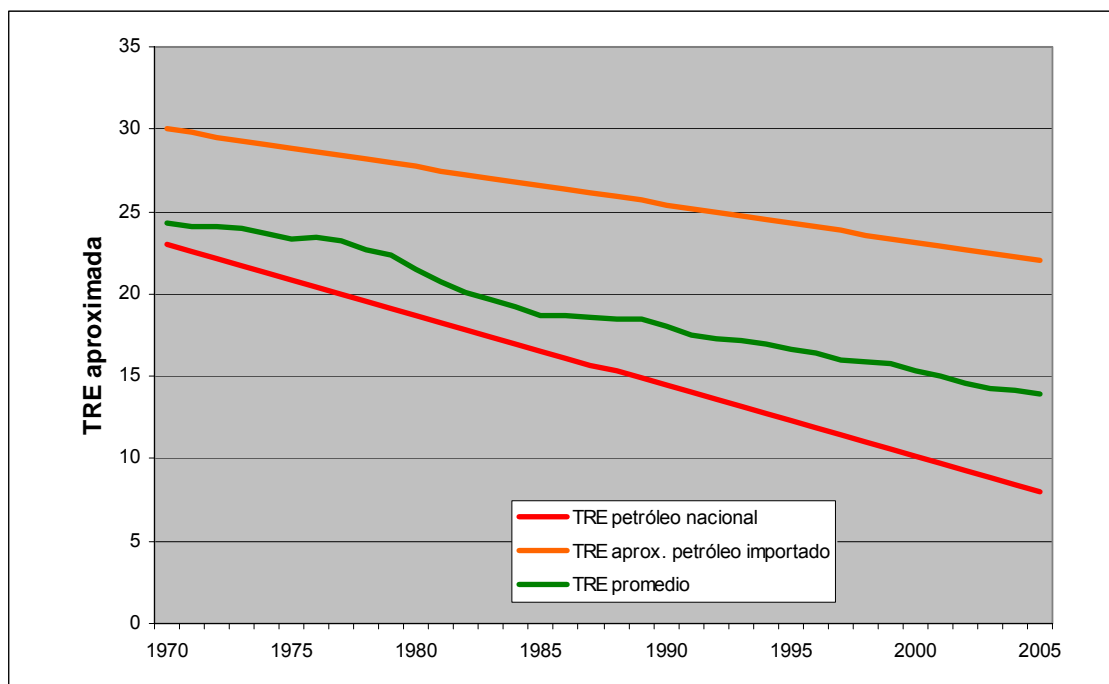


Figura 5. Tasas de retorno energético aproximadas de los petróleos nacional, importado y promedio en los EE.UU. (Datos Cleveland y Hall op. Cit y elaboración propia)

Se supone que la energía neta disponible para el consumo de la sociedad, una vez deducida la energía consumida para obtener ese petróleo, ofrecería el dato aproximado de ese petróleo en las últimas tres décadas y media, como se muestra en la figura 6

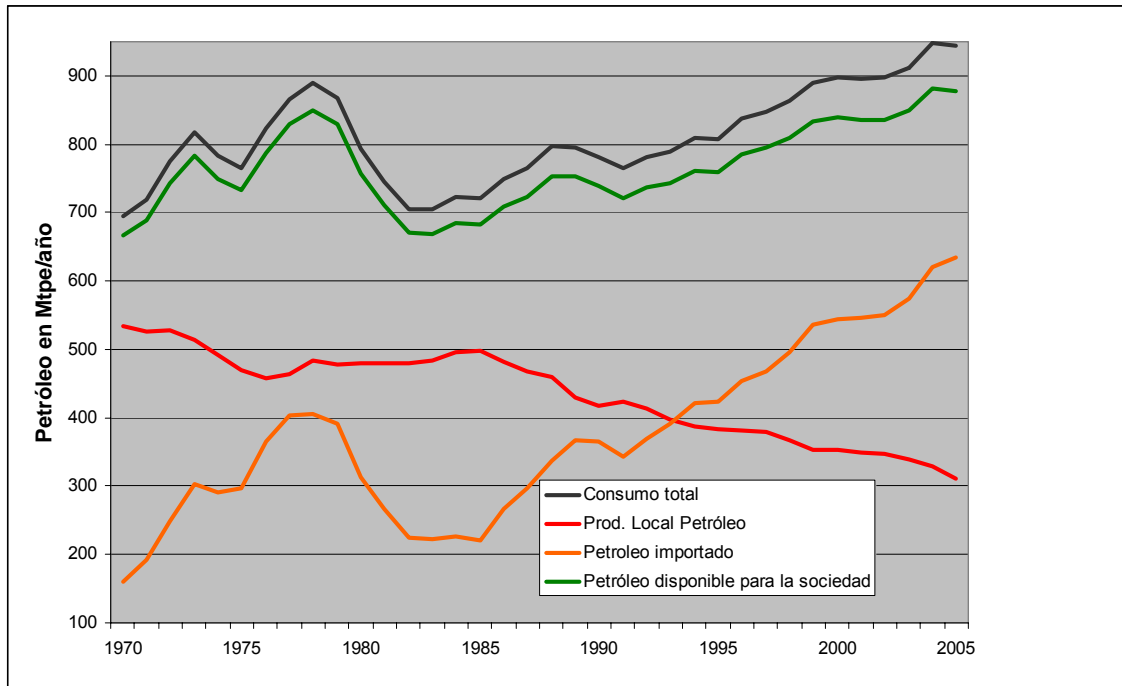


Figura 6. Evolución del petróleo nacional e importado en EE.UU. periodo 1970-2005

De todo esto se desprende que aunque la TRE del petróleo en EE.UU. haya ido disminuyendo en el tiempo, el crecimiento económico ha hecho que la energía neta final haya podido seguir siendo cada vez mayor en ese país, salvo en el periodo momentáneo y coyuntural de la crisis de los setenta y los descubrimientos de Alaska y las aguas profundas del golfo de México. En gran parte, la inevitable caída posterior de la producción nacional estadounidense, ha sido salvada y permitido el crecimiento económico y de consumo energético continuado, por importaciones de países donde la TRE es todavía sustancialmente más alta que en los EE.UU.

Pero si vemos la evolución de la población, que desde 1970 ha pasado de 200 a 300 millones de habitantes, se observa un patrón curioso en el consumo de petróleo per capita, como se muestra en la figura 7:

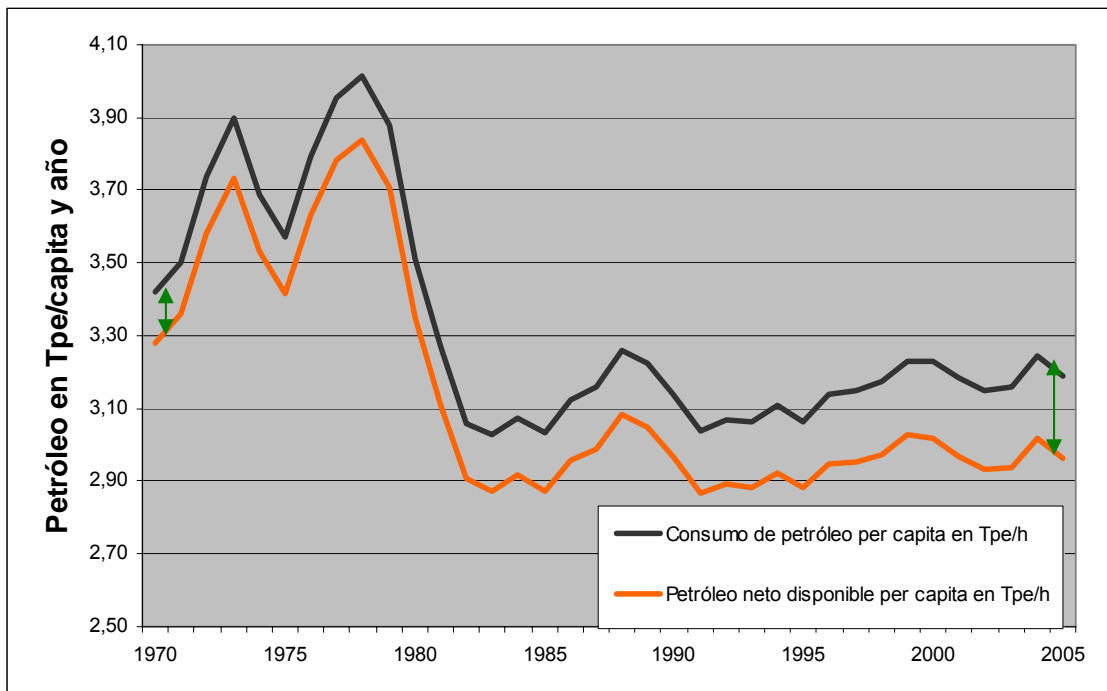
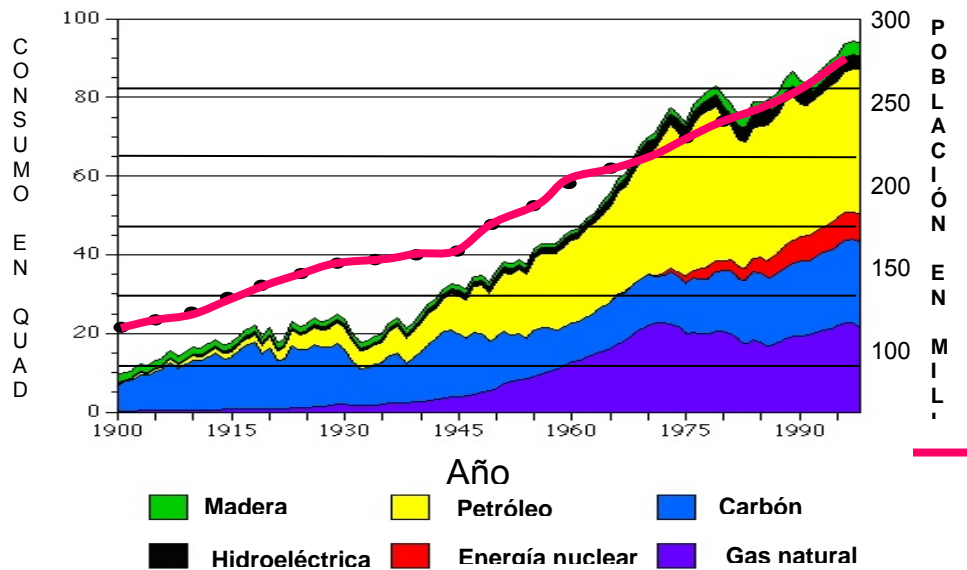


Figura 7. Consumo de petróleo per capita bruto y neto en EE. UU. 1970-2005

Esto es, se podría intuir que el consumo per capita de petróleo en los EE. UU., si bien no se ha desplomado, o caído de forma sustancial, sí que se ha estancado, a pesar de los insumos cada vez mayores del petróleo importado, especialmente si se analiza el petróleo que queda neto a disposición de la sociedad, con una caída más acusada todavía.

El drama del suministro, incluso para un país tan poderoso como los EE. UU., no es ya tanto el nivel descendente de la TRE del petróleo o del gas, sino el efecto que esta caída pueda provocar en la sociedad. No es lo mismo una TRE de entre 20 y 30 para 200 millones de habitantes, que una TRE de 15 y cayendo para 300 millones de habitantes y sus infraestructuras, que son cada día mayores y cuestan más energía mantener. Y si encima se cierne el riesgo de que el petróleo importado, que está apuntalando la TRE promedio en los EE. UU. pudiera quedar parcial o totalmente reducida o suspendida, en ese caso, la caída de la TRE podría ser brutal y a corto plazo, ya que además se realimentaría negativamente con una segura movilización de tropas y un ejército para intentar volver a asegurar las líneas de suministro. Y se ha diseñado un ejército tan moderno como consumista en energía.

Consumo de energía y población en los EE. UU. 1900-2000



Una sociedad agraria de 75 millones en EE. UU. podría quizá vivir con una TRE de 5 a 20, a comienzos del siglo XX. Una sociedad tecnológica con 300 millones y sus enormes infraestructuras y su modelo muy consumista, solo se sustenta, como tal, a determinadas velocidades de cruce consumista; sólo ha podido tener sentido por y con una TRE, que habiendo sido hasta ahora ignorada, porque se iba cómodamente por la cuenta del crecimiento y el progreso sin aparentes interferencias, con energías nuevas y poderosas nacientes y que saltó de 20 a 100 y ahora está todavía en 20. Pero seguramente quebrará si la física le obliga a bajar de nuevo a un nivel cercano a 5 y se resentirá enormemente cuando baje de una TRE de 10.

En este caso y en la caída de la curva de Hubbert y con un descenso acusado de los rendimientos, se puede decir, sin temor a confundirse, que nunca segundas partes fueron buenas. No es lo mismo, no es lo mismo, no hay simetría en pasar de una población menor en población y en infraestructuras a una sociedad, por medio de un nuevo combustible con un salto cualitativo hacia arriba en la TRE, que caer con más población e infraestructuras acomodadas a esos niveles hacia una disminución acusada de la disponibilidad de energía, neta y per capita, con la que intentar seguir manteniendo esa punta civilizatoria y tecnológica, con una población acostumbrada a crecer siempre en economía y producción, o transformación de bienes y con un crecimiento vegetativo importante. Sus estructuras, las financieras, las del modelo social, se van a resentir y veremos si aceptan la transformación programada o si terminan en luchas fratricidas, pues que todos somos hermanos, por los menguantes recursos.

En cualquier caso, las flechas que un día tiramos al cielo, comienzan a curvar en el cielo y se intuye que terminarán cayendo de nuevo. Al final, la ley de la gravedad y la de la termodinámica, exigen siempre su cumplimiento.

Pedro Prieto
Crisis Energética
10 de diciembre de 2006