

**Antonio Turiel**

## **Energía, entropía y exergía**

Queridos lectores:

Mientras esperamos que llegue el próximo otoño con no pocos nubarrones en su horizonte (la escasez de algunas materias primas podría desencadenar algunas interrupciones temporales de suministro), seguimos enfrascados en la discusión de la transición energética que, ahora sí, ya casi todo el mundo parece aceptar como inevitable; y más importante que la necesidad de transición, lo que resulta clave es discutir qué modelo de transición queremos llevar a cabo. Ya hemos comentado en estas mismas páginas y con cierto detalle [por qué el modelo de transición que se está intentando imponer probablemente no es viable ni conveniente](#), y por qué es importante buscar modelos alternativos más locales y resilientes. En el transcurso de las discusiones que cada vez más menudean en las redes sociales (ya que la discusión energética está tomando una gran centralidad), me he encontrado con algunos temas que se repiten continuamente y que demuestran la gran confusión que hay sobre los términos reales de la discusión energética. Lo más curioso es que no pocas veces quienes propagan conceptos erróneos son gente que tiene una formación técnica adecuada como para no cometer esos errores. Pero no los propagan por malicia o de forma interesada, sino porque han oído tantas veces ciertas ideas-fuerza completamente desatinadas que ya las han aceptado de manera acrítica, sin revisarlas a la luz de su propio conocimiento. Por eso mismo, he creído oportuno escribir algunos *posts* que, a partir de ejemplos concretos, me permitan contextualizar correctamente esos conceptos y mostrar cómo se aplican a nuestra situación.

En el *post* de hoy me voy a centrar en una afirmación repetida tantas veces que al final se ha convertido casi en una caricatura de sí misma: «No hay un problema de crisis energética en absoluto. El Sol nos proporciona una cantidad de energía inmensamente mayor a la que consume la Humanidad.»

Examinemos primeros los datos.

En lo alto de la atmósfera, [el ángulo sólido que distiende la Tierra intercepta unos 1367 vatios por metro cuadrado \( \$W/m^2\$ \) del flujo solar](#): es decir, llegan 1.367 julios de energía por segundo y por metro cuadrado. Sin embargo, dada la geometría esférica de la Tierra y que siempre la mitad de la misma está a oscuras, el flujo de energía solar que llega a la atmósfera alta es en promedio temporal y de toda la superficie del planeta  $340 W/m^2$ . El 26% de eso es reflejado por la atmósfera y las nubes, así que a la superficie terrestre llegan en promedio unos  $250 W/m^2$ . La superficie de la Tierra es de 510 millones de kilómetros cuadrados, es decir  $5,1 \cdot 10^{14} m^2$ , así que toda la potencia radiante del Sol que llega a la superficie de nuestro planeta es de unos  $1,28 \cdot 10^{17} W$ , es decir, unos 128 PW (petavatios), que multiplicado por las 8.760 horas de un año representa un influjo energético anual de alrededor de 1,12 millones de PW·h. En 2019 (actual máximo de consumo energético de la humanidad) se consumieron unos 163 PW·h, contando todo tipo de fuente energética. Así pues, la energía del Sol que llega a la superficie terrestre representa unas 6.880 veces la energía que consume toda la humanidad (9.050 veces si comparamos con la energía solar que llega a lo alto de la atmósfera).

Por tanto, es cierto que el Sol nos envía una cantidad de energía mucho mayor que la que consumimos. No infinitamente mayor, pero ciertamente muchísimo mayor.

Y aquí es donde empiezan las pegas.

Las primeras son obvias: casi tres cuartas partes del planeta están cubiertas por mares, y allí obviamente no es fácil aprovechar la energía solar. Hay montañas altas y zonas umbrías donde tampoco resulta demasiado conveniente. No olvidemos también que el planeta ya usa la energía solar para procesos fundamentales, desde el ciclo del agua hasta los vientos, pasando por la fotosíntesis de plantas y algas. Seguramente la superficie razonablemente accesible para el aprovechamiento energético solar no sobrepasa el 10%. Daría igual: como dicen los proponentes solares, basta y sobra con un 1%. Un 1% de 6.880 es 68,8, es decir, que con aprovechar el 1% de todo el influjo solar a nivel de superficie cubriríamos casi 70 veces el consumo energético mundial.

Y es aquí que entra la exergía.

Se define exergía como la cantidad de trabajo útil que uno puede conseguir a partir de una cierta cantidad de energía (fuente de energía) dada. La exergía es un concepto recíproco al de la entropía: cuando usamos una fuente de energía para hacer un trabajo útil, la exergía es lo que nos queda después de las pérdidas causadas por el aumento de la entropía (el concepto de entropía ya fue discutido en este blog; si les interesa, pueden leer [el post correspondiente](#)).

En virtud del Principio de la Termodinámica, la energía siempre se conserva. Como se suele decir: la energía ni se crea ni se destruye, solamente se transforma. Por eso no hay energía gratis: la energía siempre tiene que salir de algún lado. Pero hay más: el Segundo Principio de la Termodinámica nos dice que cuando transformamos una forma de energía en otra siempre se produce disipación, es decir, una parte de la energía se transforma en calor. Es decir, va a incrementar la energía térmica de los cuerpos implicados. La energía térmica de los cuerpos no es más que una medida de la energía cinética de los movimientos aleatorios de las moléculas que los componen. En suma, al transformar la energía de una forma a otra, una parte de esa energía se va en mover aleatoriamente los átomos y moléculas de los cuerpos implicados (que

decimos que se calientan), de forma inútil para nosotros. No podemos evitarlo. Es como si intentásemos echar agua potable de un bidón a otro bidón, y este segundo bidón estuviera sobre una plataforma que se mueve considerablemente rápido: por más que queramos evitarlo, una parte del agua caerá fuera. No desaparece (la energía se conserva) pero ya no la podremos aprovechar. Se convierte en energía dispersa, en movimientos desordenados, en energía térmica.

Déjenme que abra aquí un paréntesis. Por medio de una *máquina térmica* se puede aprovechar la energía térmica para hacer un trabajo útil, es decir, para producir exergía. Solo sabemos hacerlo, eso sí, si tenemos algún medio para aumentar enormemente la energía térmica del cuerpo en cuestión. Es lo que pasa, por ejemplo, cuando calentamos un depósito de agua con el calor desprendido de quemar un combustible. El agua se transforma en vapor que, a alta presión, sirve para mover un pistón: es la máquina de vapor. De ese modo, aprovechamos el movimiento desordenado de las moléculas de vapor de agua para generar un movimiento de gran escala, el del pistón, y así hacer un trabajo. Es una manera tremendamente ineficiente de aprovechar la energía: las máquinas de vapor clásicas tenían eficiencias en torno al 8%. Se puede mejorar mucho la eficiencia pasando de motores de combustión externa a motores de combustión interna, en los que el combustible se quema en pequeñas dosis dentro de la propia cámara donde se hace la expansión del fluido de trabajo, pero aún así la eficiencia se suele mover, en el caso de los coches de hoy en día, en torno al 15% para los motores de gasolina y al 20% en los de diésel (grandes máquinas diésel con regímenes bajos de revoluciones pueden alcanzar eficiencias de hasta el 50%, cercanas al límite de eficiencia máximo del ciclo de Otto, pero no son obviamente las que se usan en los coches). En todo caso, las máquinas térmicas no son muy eficientes, y mucho menos si se quiere conseguir altas potencias (por comparación, un motor eléctrico suele tener eficiencias del 80 o 85%).

En fin, volviendo a la cuestión de la exergía, cuando hablamos de fuentes de energía deberíamos más bien de hablar de fuentes de exergía. No importa cuánta energía contenga el combustible o se encuentre en el ambiente que nuestro sistema va a utilizar; lo que importa es cuánto trabajo útil se puede hacer con ella. Y ese es el problema de la energía solar: puede haber grandes cantidades de energía disponible, pero la cantidad de exergía que se puede producir es mucho más pequeña.

El argumento sobre la abundancia de energía en el ambiente no nos dice absolutamente nada sobre lo que podemos hacer realmente. De hecho, nos rodean cantidades simplemente alucinantes de energía que no podemos aprovechar. Tomando la relación de Einstein  $E=mc^2$ , sabemos que podríamos convertir 1 kg de masa de cualquier sustancia en aproximadamente  $9 \cdot 10^{16}$  julios de energía, es decir, 25 TW·h. «Quemando» solamente 6.500 kg de materia podríamos producir los 163 PW·h que consumió la Humanidad en todo 2019. Dado que la masa de la Tierra es de casi  $6 \cdot 10^{27}$  kg, tendríamos energía para más de  $9 \cdot 10^{27}$  años, mucho más que los  $5 \cdot 10^9$  años que se espera que le quedan de vida a nuestro planeta: en el momento en el que el Sol se convierta en una gigante roja y acabe con la Tierra, por este procedimiento de desintegración solo habríamos consumido 5 billonésimas partes de la masa de nuestro planeta. Así pues, no debería haber ninguna crisis energética, teniendo en cuenta cómo llegamos a nadar en océanos de energía.

Y en cierto modo así es: no tenemos una crisis energética, tenemos una crisis exergética. Lo que nos falta es tener energía fácilmente aprovechable para hacer trabajo útil. La energía que nos

Llega del Sol está ya muy entropizada, es ya muy similar a la energía térmica, y ponerla a trabajar para hacer trabajo útil es muy complicado y tiene intrínsecamente muy poco rendimiento.

Afortunadamente tenemos a nuestro alrededor máquinas que se han desarrollado durante centenares de millones de años para aprovechar esta fuente tan poco exergética: las plantas y las algas. Las plantas verdes tienen una eficiencia en la producción de biomasa a partir de la fotosíntesis de alrededor del 1%; las algas, que no necesitan tanto tejido conectivo, llegan al 8%. Pueden parecer rendimientos muy bajos comparados con los paneles fotovoltaicos más comúnmente instalados hoy en día (alrededor del 20%) o de los prototipos de laboratorio (alrededor del 50%), pero fíjense que comparamos la producción de biomasa con la de electricidad. Las plantas y las algas son sistemas autorreparantes, reproductivos y que reciclan sus materiales de una manera tremendamente eficiente, de manera que están ahí desde hace millones de años. Por su parte, no contabilizamos en la eficiencia los gastos energéticos y de materiales que se necesitan para producir, instalar, mantener y desmantelar al final de su vida útil los paneles fotovoltaicos. Nosotros solo somos capaces de conseguir altos rendimientos en la conversión de energía solar en electricidad usando materiales disponibles en cantidades limitadas (por ejemplo, la plata) y con procesos extractivos en minas (como el cuarzo que se usa para hacer las placas; ¿o es que Vd. se creía que se hacen con arena, como a veces se dice?) que requieren mucha energía, mientras que las plantas y algas usan los materiales comúnmente disponibles en el medio ambiente y que encima se encuentran fuertemente dispersos (entropizados). Esos materiales que extraemos y procesamos para producir las placas fotovoltaicos los hemos podido procesar y los estamos procesando usando combustibles fósiles: se utiliza masivamente combustibles derivados del petróleo para la extracción en minas remotas, en excavadoras y para el transporte en camiones y en barcos, y se usan gas y carbón para producir el calor y la electricidad que se utilizan para las diversas fases del procesado. Sin esos combustibles fósiles, que [ahora empiezan a escasear](#), no podríamos producir ni instalar esas placas; nunca hemos cerrado el ciclo de producir con energía renovable los propios sistemas renovables, y [muchos autores dudan de que se pueda hacer](#). Por contraste, las plantas y las algas solo tienen una fuente de energía, el Sol, y la utilizan para todo: para transportar nutrientes a través de los tejidos conductivos usando la evapotranspiración, y para hacer la fotosíntesis; todo se construye con esa energía solar, y todo con ella se mantiene.

¿Creemos de verdad que el rendimiento exergético de la energía solar nos permitiría producir 70 veces nuestro consumo actual? Cuando se tiene en cuenta la densidad energética por superficie de instalación y el coste en materiales, el potencial exergético de la energía solar es mucho menor: de acuerdo con la estimación del [artículo de Carlos de Castro et al, \(2013\)](#), estaría limitado a un 20% del consumo global de energía actual. No es 70 veces, sino 1/5.

Pero el problema no es solo la exergía. Es la resiliencia.

¿Creemos de verdad que podremos mantener los complejos y fuertemente dependientes sistemas fotovoltaicos durante millones de años de la misma manera que se han mantenido (y se mantendrán) las plantas y las algas? Parece extremadamente poco probable, no que duren millones de generaciones, sino que duren más de una. Cuando estas instalaciones que masivamente desplegamos ahora acaben su vida útil, ¿cómo las sustituiremos? No podemos reciclar sus materiales sin consumir mucha energía (de nuevo, el rendimiento exergético es muy bajo) y no sabemos hacerlo, a día de hoy, sin combustibles fósiles.

Tenemos por delante decisiones críticas y muy difíciles de tomar. No podemos deslumbrarnos con números absurdos, como la cantidad total de energía en el ambiente, sin mirar cuál es el rendimiento real de los sistemas que se proponen. No tenemos mucho tiempo. No hay tiempo, sobre todo de tomar decisiones erróneas. Tenemos que invertir nuestros esfuerzos para la transición con precaución, ya que no podemos permitirnos el lujo de embarcarnos en iniciativas que a la larga se demostrarán como no sostenibles. No podemos cometer ese error una vez más.

[Fuente: [The Oil Crash](#)]