

LAS VISIONES DEL MUNDO SEGÚN NEWTON Y LA TERMODINÁMICA. LAS FUENTES DE ENERGÍA

Roberto E. Cunningham

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

En la primera parte se efectúa el análisis de la mecánica newtoniana y de la visión del mundo que la misma involucra: percepción y explicación de la observación directa de lo cotidiano. Newton no viola nuestra intuición como pueden hacerlo las mecánicas relativistas y cuántica. En materia de artefactos los molinos medievales responden a la visión newtoniana. Pero en la Revolución Industrial aparecen máquinas térmicas y, con ellas, la termodinámica. El concepto de calor genera una confusión inexistente en la mecánica newtoniana. Más aún, hay todo un contrapunto entre la historia y la visión de la mecánica newtoniana con la termodinámica. Este contrapunto se expresa en el enfrentamiento de fuerza con energía, cálculo diferencial con álgebra, orden con desorden, reversibilidad con irreversibilidad, gravedad con entropía, lo individual con lo estadístico. En la segunda parte se efectúa un análisis termodinámico de nuestra civilización. Se muestra la impronta que ha dejado el petróleo en nuestra civilización: el aporte energético de las máquinas que nos rodean es equivalente al que proporcionarían 500 esclavos al servicio de cada uno de nosotros, la caloría del petróleo es 1.000 veces más barata que la del hombre. Pero, además, y en todo caso como consecuencia de ello, el consumo de energía por unidad de energía contenida en el producto es hoy 100 veces menor que en la Edad Media.

Palabras clave: Mecánica newtoniana, Termodinámica, Revolución Industrial

Abstract

The visions of the world after Newton and the thermodynamics. The energy sources. In the first part an analysis of Newtonian mechanics is made as well as of its world vision: direct perception and explanation of the world we see. In reference to artifacts, medieval engines reflect Newtonian viewpoint. Newton does not violate our intuition as could happen with relativity and quantum mechanics. However, with the Industrial Revolution thermal engines came out and, with them, thermodynamics was developed. The concept of heat produces a confusion which is absent in Newton. Even more, there is a true counterpoint between history and vision of Newton with that one of thermodynamics. This counterpoint is stated in the confrontation between: force with energy, calculus with algebra, order with disorder, reversibility with irreversibility, gravity with entropy, individual with statistical. In second part, a thermodynamic analysis of our civilization is performed. Cats left by oil is shown: energetic supply of engines which surround us is equivalent to a set of 500 slaves working for every one of us, calory of oil is 1,000 times cheaper than human. But, besides, and in any case because of this, energy consumption per unit of energy content in product nowadays is 100 times less than in Middle Age.

Key words: Newtonian mechanics, Thermodynamics, Industrial Revolution

Primera Parte

Newton y Clausius

Introducción

A lo largo de la historia, las distintas sociedades han asistido al desarrollo de, a veces modelos, a veces paradigmas, que en algunos casos han implicado determinadas imágenes o concepciones del mundo: la tierra es el centro del Universo (Ptolomeo), las almas pertenecen a un estadio superior (Platón), en el mundo supralunar reside la quintaesencia (Aristóteles).

En cada caso, esta imagen deriva a su vez en una visión, por ejemplo, geocéntrica, heliocéntrica, etc. Ello a su vez conduce a un enfoque o abordaje del mundo en el que vivimos.

La mecánica de Newton

Fueron necesarios prácticamente veinte siglos para que la imagen aristotélica del Universo diera lugar a la elaborada por Isaac Newton (1642-1727) en el siglo XVII. En tal sentido, debemos observar que la mecánica newtoniana describe el mundo que percibimos cotidianamente: movimientos de astros y péndulos, choques y caídas de cuerpos, trayectorias de proyectiles, etc.

Newton realizó una síntesis genial de Kepler y Galileo, junto con Copérnico, habiendo inventado previamente el cálculo infinitesimal y aplicado el mismo en sus desarrollos. Para ello, salido ya de la adolescencia, había aprendido a solas, y en un año y medio, toda la matemática de su época.

Por lo dicho precedentemente, la mecánica newtoniana ratifica nuestra intuición acerca de la percepción del mundo, dado que ésta se nutre de lo que observamos a nuestro alrededor.

Por otro lado, la interpretación newtoniana del mundo es mecanística y en tal sentido se enlaza con la metafísica cartesiana que veía en todo fenómeno natural la posibilidad de una explicación de esa naturaleza. Ello, pese a las diferencias de Newton con Descartes.

La mecánica newtoniana también explica el funcionamiento de los molinos que representaban la única forma de mecanización de su época.

Maxwell y el concepto de campo

El hito siguiente al de Newton se debe a James Clerk Maxwell (1831-1879) en el siglo XIX. Maxwell, de eximia formación teórica, toma en cuenta las experiencias de su contracara, Michael Faraday (1791-1867), de escasa instrucción académica, casi incapaz de expresar algebraicamente la ley de Ohm y, pese a ello, distinguido demos-

trador de experimentos en la Royal Society y ameno expositor en sus charlas de los viernes por la tarde en la Royal Institution.

Maxwell crea el concepto de campo, una abstracción de avanzada para su época. A diferencia del mundo de Newton, el campo como objeto es de percepción menos directa. Se necesita de un Hertz y un Marconi para detectarlo en la radiofonía o hay que esperar a Röntgen con una placa radiográfica.

La abstracción maxwelliana aparece anticipadamente en Newton cuando éste le escribe a un amigo manifestándole su desconfianza en cuanto a que la fuerza entre dos masas tenga existencia real: "Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia, de modo que un cuerpo pueda actuar a la distancia sobre otro, a través del vacío, sin ningún intermediario que transmita dicha acción o dicha fuerza de uno a otro, es para mí un absurdo tan grande que me resulta imposible que un hombre capaz de tratar las materias filosóficas pueda caer en ello".

Las mecánicas relativista y cuántica

Demos ahora un salto al siglo XX para después volver a retroceder.

La física relativista se desarrolla sobre la base de experimentos mentales de Einstein (cual un Galileo moderno) con soporte matemático. Pero nos provee la imagen de un macrocosmos distinto del que percibimos y que, por ende, no se corresponde con lo que intuimos. Nuestra percepción cotidiana nos muestra un tiempo absoluto, como postulara Newton. Einstein mismo pensaba que su retraso intelectual de pequeño le había permitido recurrir luego a imágenes mentales a una edad en la cual otros niños ya las habían abandonado.

A su vez, la mecánica cuántica nos ofrece, vía desarrollos matemáticos, propiedades del microcosmos totalmente imprevisibles y, más aún, desconcertantes. Ello también escapa totalmente a nuestra intuición.

Lo infinito y lo infinitesimal están fuera de nuestra cotidianeidad.

La Revolución Industrial, el carbón y las máquinas térmicas^{2, 3, 8}

Pasemos al siglo XVIII, testigo de uno de los dos cambios más importantes de la humanidad: la Revolución Industrial (el otro fue la Revolución del Neolítico), ocurrida durante la segunda mitad de dicha centuria.

Hasta entonces el panorama de la humanidad había mostrado un devenir caracterizado por la ausencia de cambios significativos en las

condiciones de vida. Los aspectos más salientes de dicho panorama estaban dados por cinco características:

1) Agrodependencia: las necesidades vitales básicas del hombre: vivienda, alimento, lumbre y vestimenta se fabricaban con materias primas provenientes del agro en su inmensa mayoría: madera, leña, fibras vegetales y animales, cueros, huesos, aceites y grasas. Como consecuencia, la mano de obra estaba vinculada casi exclusivamente con el agro. Sólo escapaban a esta relación los picapedreros y herreros.

Notamos que estas materias primas dependían de recursos renovables sometidos a ciclos de vida prácticamente incontrolables. Su nivel de producción tenía, por tanto, un límite. Ello a su vez generaba el segundo aspecto, a saber,

2) Progreso con límites acotados: los tres factores de la producción de los economistas clásicos eran, como sabemos, capital, tierra y trabajo. La finitud de la extensión de la tierra ponía un límite a la capacidad global de producción. Como consecuencia, existía evidencia del fenómeno de los retornos (o utilidades) decrecientes en Economía, pues la sociedad preindustrial había entrado en la región de los mismos. Adam Smith, David Ricardo, John Stuart Mill, Thomas Robert Malthus nos hablan al respecto. Se había difundido el concepto de que no era posible crecer más allá de un cierto límite. Ello a su vez se ligaba con el tercer aspecto,

3) Incrementos muy pequeños en materia de productividad: si bien es cierto que durante la Edad Media se introdujeron algunas innovaciones tecnológicas (provenientes, hay que reconocerlo, de otras latitudes), las mismas no alcanzaron para provocar un quiebre en materia de productividad.

4) Por otro lado, en materia de energía se dependía de la tracción a sangre animal y humana, de la leña o el carbón vegetal y de los molinos eólicos e hidráulicos.

5) La población tampoco crecía demasiado: hambrunas, pestes o guerras se encargaban de mantenerla en un nivel más o menos constante.

Pero la Revolución Industrial rompió bruscamente este panorama; lo hace por dos razones fundamentales y ambas nos interesan específicamente.

Por un lado tenemos la sustitución del carbón vegetal por el mineral que arranca gracias a la inquietud de un maestro cervecero de Birmingham en el proceso de secado de la cebada¹.

¹A propósito, el particular bouquet del whisky escocés se debe a los humos de la hulla.

Ello continúa con Abraham Darby I (1678-1717) empleando coque en el alto horno de Coalbrookdale a partir de 1709.

Por otro lado, tenemos la innovación de la máquina atmosférica por Thomas Newcomen en 1712, seguida de su optimización por James Watt en 1769. Esta máquina empleaba carbón mineral como combustible para generar el vapor que la movía.

Ante este panorama, los economistas clásicos, adheridos a las ideas malthusianas, pronosticaban el fracaso de esta innovación en cuanto a romper las barreras al progreso. Su lógica parecía irrefutable pues argumentaban que no se podía sustituir con ventaja un recurso renovable (la leña) por otro agotable (el carbón mineral). No reparaban en que las cuantiosas reservas del último lo habían prácticamente inagotable para el consumo de la época. Dicho en otras términos, surgía un sistema con realimentación positiva para sustituir a otro con realimentación negativa.

A su vez, la máquina térmica nos interesa por cinco razones:

1) Por primera vez en la historia de la humanidad el hombre logra transformar calor en trabajo útil. Cuando los griegos usaban el aparejo para mover un peso con una fuerza varias veces menor, decían que estaban burlando a la naturaleza. Con la máquina térmica ocurría algo semejante pero mucho más sutil. La máquina térmica es antinatural, como luego lo sería una instalación frigorífica.

2) La máquina sustituye mano de obra, por primera vez de modo masivo.

3) Pese a que la eficiencia térmica de las primeras máquinas no superaba el 1%, ello bastó para provocar un cambio radical en la economía de producción.

4) Este cambio se evidencia cuando observamos que la energía mecánica pasa de ocupar el 6% de la matriz energética preindustrial al 96% en el siglo XIX.

5) La máquina térmica es el agente disparador de las ideas que, muchos años después y tras muchas dificultades, culminan con el establecimiento de la termodinámica, tema éste que trataremos a continuación.

La visión termodinámica del mundo^{1, 4, 5}

La máquina térmica, o atmosférica o de vapor, irrumpió en un mundo de molinos eólicos e hidráulicos. Los tres artefactos tenían un denominador común: producían trabajo. Los molinos lo hacían como consecuencia de la fuerza del viento o del agua. Apelaban pues, como hemos dicho, a un concepto de cuño newtoniano.

Era entonces natural que, para explicar el funcionamiento de la máquina térmica se recurriera a una explicación similar: era el calor el que la movía. El calor, fluido insustancial pero de existencia cierta, entraba y salía de la máquina, moviéndola.

El calor resultó ser siempre algo extraño, desde la antigüedad misma. Percibible sólo por el sentido del tacto, su origen y naturaleza fueron un misterio por muchos siglos. Distinto de la fuerza, asociada al accionar humano o animal desde el primer instante.

Para los griegos "calor es lo que produce sensación de calor": irrefutable y perogrullesco. Pero la experiencia de sumergir una mano en agua fría y otra en agua caliente para luego colocar ambas en agua tibia, hizo cambiar la explicación: "siempre que el calor fluye hacia nuestros cuerpos produce la sensación de calor; cuando lo hace desde nuestros cuerpos produce la sensación de frío". Pasó ésta a ser la segunda teoría del calor que incorporaba un avance: la idea de flujo.

La misma perduró hasta 1592, año en que Galileo inventa lo que él denominó termoscopio (hoy termómetro) a columna de agua. Y el calor pasó a ser "lo que origina que una columna de agua cambie de altura". Y fue la tercera teoría. Se sustituía así la sensación humana por una puramente objetiva.

Hasta que a fines de la década de 1750, simultáneamente con la aparición de la máquina térmica, Joseph Black (1728-1799), en la Universidad de Glasgow, comienza a calentar en forma conjunta distintas sustancias en un mismo horno. ¡Y observa que alcanzan temperaturas distintas en un mismo tiempo! A su vez, los químicos de la época interpretaban la fusión o la evaporación como la reacción entre el calor y un sólido o un líquido, respectivamente.

Y hay más hechos que aumentan la confusión acerca de la naturaleza del calor. Así por ejemplo, el conde Benjamín Thompson Rumford (1753-1814) observaba en Munich que cuando barrenaba cañones se generaba calor. Por otro lado, en 1799, Humphry Davy (1778-1829) fundía dos trozos de hielo por fricción entre los mismos.

La teoría del calórico imperante entonces explicaba estos fenómenos como la liberación del calor, debido a la fricción, que surgía de la materia proveniente de su composición química.

En 1802 Davy observa que la electricidad, a su paso por determinados conductores, hace que éstos emitan luz. Esta propiedad no se relacionó con las anteriores pero el que supo aprovecharlas fue Edison.

Cabe por otra parte consignar que estas novedades poco preocupaban a los creadores y usuarios ingleses de las máquinas térmicas.

Ello se correspondía tanto con las características culturales de la Revolución Industrial como con los técnicos ingleses de la época. En efecto, la lanzadera volante, punto de arranque de la revolución del telar, fue el invento de un relojero de Bury, John Kay, en 1733. El nuevo huso de hilar, denominado water frame, se debió a un peluquero analfabeto de Preston, John Kay, en 1774. El inventor de la máquina atmosférica, Thomas Newcomen, era herrero y James Watt era un constructor de instrumentos de precisión. Justamente, Watt había sido llamado por Black para reparar la máquina de Newcomen y ello le permitió desarrollar la suya.

Los ingleses, pragmáticos al fin, hicieron la Revolución Industrial pero no se preocuparon en explicarla. En cambio, en Francia estaba la Escuela Politécnica que permitía el contacto entre ingenieros y científicos, y con ella arranca la dilucidación de la naturaleza del calor que se concreta más tarde en Alemania.

Así pues, tenemos inicialmente el aporte de Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830) que en 1822 publica su "Teoría analítica del calor" dedicada al tratamiento matemático de la conducción del calor en cuerpos de distintas geometrías pero no de los efectos mecánicos del mismo. Sin embargo, debemos a Fourier una frase anticipatoria: "Hay una amplia variedad de fenómenos que no se producen mediante fuerzas mecánicas sino que resultan exclusivamente de la presencia y acumulación del calor. Esta parte de la filosofía natural –continuaba– no puede subsumirse bajo las teorías dinámicas, sino que posee principios suyos particulares, utilizando un método similar al de las otras ciencias exactas". Para Fourier, el estudio de los fenómenos térmicos era una ciencia distinta de la mecánica. Con ello, ponía la pica en territorio newtoniano.

En tanto, hijo del célebre ministro de guerra de Napoleón, el ingeniero militar Lazare Sadi Carnot (1796-1832) publicaba en 1822 su obra prima "Reflexiones sobre la fuerza motriz del fuego", donde trataba de explicar el funcionamiento de la máquina térmica.

En rigor, a Carnot le preocupaba el hecho de que las máquinas inglesas fueran más eficientes que las francesas. Pero él seguía aplicando la teoría del calórico en la máquina térmica. De todos modos, verificaba que la mejor de estas máquinas era veinte veces menos eficiente que lo que él pretendía con su ciclo. El concepto de idealidad aún no se había instalado.

En 1830 Carnot comenzaba a darse cuenta de que este enfoque era equivocado y que en rigor una parte del calor se convierte en energía mecánica. Pero muere de cólera en 1832 y muchos de sus apuntes son entonces quemados.

Si en Inglaterra la relación calor-trabajo era simplemente aprovechada en la industria y en Francia se la trataba de explicar, en Alemania había inquietudes similares pero en relación con los seres vivos, como lo atestiguaran los trabajos del médico Robert Mayer (1814-1878). De modo visionario, Mayer entendía que una única causa original había generado un conjunto de diversas fuerzas que podían intercambiarse entre sí pero manteniéndose constante su suma. Pretendió publicar su trabajo en 1842 en *Annalen der Physik und Chemie* pero el mismo le fue rechazado por no tener soporte experimental.

Nadie había reparado que dos años antes, el hijo de un próspero cervecero escocés y aficionado a los experimentos, James Prescott Joule (1818-1889), había observado en Manchester que un conductor se calentaba al paso de la electricidad, algo similar a lo detectado por Davy 38 años antes.

Tampoco este hecho llamó la atención y, más aún, la Royal Society rechazó las presentaciones de Joule poniendo en evidencia el divorcio existente entre los científicos de la Society londinense y los industriales de Manchester.

Pero en 1847, William Thompson, Lord Kelvin, (1824-1904) advertía en la misma Royal Society que los trabajos de Joule entraban en contradicción con la teoría del calórico.

Obsérvese, por comparación con la mecánica de Newton, cuán lleno de obstáculos estuvo el camino de la dilucidación de la relación calor-trabajo.

La aclaración y explicación final para esta serie de confusiones la dio Rudolph Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), decimocuarto hijo de 18 hermanos y el físico prusiano más célebre de su época. Clausius observa que cuando gases o vapores se expanden contra una fuerza opuesta realizan un trabajo mecánico perdiendo calor y en 1850 presenta lo que hoy llamamos Primer Principio de la termodinámica.

Ello significó el reconocimiento mundial a Clausius y la reivindicación de Mayer, hasta entonces marginado de la comunidad científica. Asimismo, en 1851 William Thompson se retractaba finalmente de su anterior adhesión a la teoría del calórico. Reconocía sus méritos al "señor Joule, de Manchester, que expresa muy claramente las consecuencias... que siguen del hecho de que

el calor no sea una sustancia". Hasta llegó a tocarse el sombrero frente al extranjero Mayer cuyo artículo "contiene algunos enfoques correctos en relación con la convertibilidad mutua del calor y el efecto mecánico". Y también rindió homenaje al joven Clausius quien "mediante razonamiento mecánico... ha llegado a ciertas conclusiones notables". Pero agregaba: "Permítaseme que añada que... la interpretación del principio de Carnot se me ocurrió antes de saber que Clausius había enunciado o demostrado la proposición".

Todavía estaban en pie los rencores de la disputa Newton-Leibniz...

La siguiente preocupación de Clausius fue explicar qué ocurría con el fenómeno de la energía cuando su transformación ocurría bajo variación de la temperatura. Ello le llevó varios años hasta que en 1865 pudo mostrar que si medía las cantidades de calor tomada y cedida por la máquina y las dividía por las temperaturas absolutas de la fuente de calor y del refrigerador, respectivamente, los valores así resultantes eran iguales. Clausius dio a este último el nombre de entropía. Y así nació el Segundo Principio.

Ahora bien, como consecuencia de la peste que había paralizado las actividades del Trinity College en Cambridge, Newton había necesitado unos meses de reclusión en su granja para fundar su mecánica y explicar una parte del mundo, la de las fuerzas.

Como hemos visto, contrariamente, el mundo de la energía requirió de la controversia y el concurso de varios científicos e ingenieros para poder ser explicado. Y Clausius necesitó igual número en años que Newton en meses para completar su tarea. Era lógico: el ser humano puede percibir tanto una fuerza como el calor, pero no la energía.

La fuerza se percibe en la tracción a sangre o en los molinos. Necesita de un objeto material contra el cual manifestarse o transmitirse; por eso Newton descreía de la misma como actora entre astros. La quintaesencia o el éter: este último era aprovechado por Newton para decir que sus condensaciones y penetraciones intramateriales explicaban la atracción. De nuevo la acción mecánica.

Pero después aparece la fuerza de origen no mecánico que mueve la máquina térmica.

Es interesante comparar esta relación entre la formulación matemática y la representación física adjudicada. Newton habla de fuerzas entre masas pero no cree en ellas. Maxwell se encuentra con un término en sus ecuaciones diferenciales que interpreta como la expresión de

una onda electromagnética; pero, teórico al fin, no le preocupa su verificación experimental. Finalmente, en termodinámica no hay un correlato matemático comparable con los dos casos anteriores: sólo hacía falta expresar la equivalencia entre calor y trabajo. Nada más. Ni nada menos. Necesariamente, la interpretación física se antepone a su descripción matemática. Pero, ¿cómo imaginar por entonces que la chispa del herrero, el calentamiento de su sierra o barreno, la estrella fugaz que oculta el meteorito incandescente y el principio en que se basa el funcionamiento de la máquina térmica no eran sino más que distintas manifestaciones de un mismo fenómeno?

Por otro lado, más allá de la descripción matemática del mundo cotidiano, la extensión conceptual del pensamiento newtoniano supone un modo de ver, un enfoque, un abordaje del mundo. Es el mundo de las relaciones de fuerzas y, además, es el mundo de lo reversible. En las ecuaciones de Newton no hay una flecha del tiempo.

La termodinámica también deriva en un modo de abordar el mundo, si bien ello es menos evidente. Es el mundo de la conservación y degradación de la energía, con una flecha de tiempo.

La matemática de la termodinámica es enormemente más simple que la newtoniana. Pero la física de la termodinámica es mucho más compleja de aprehender que su correlato newtoniano. Por eso es difícil razonar termodinámicamente. Y además es el mundo de lo irreversible.

Newton pone orden; la termodinámica es desequilibrio y desorden; y se ocupa de aquellos cambios que puede sufrir un sistema y que no son explicables por la mecánica.

Es pues fácilmente previsible que ambos modos de asomarse a la realidad puedan conducir a visiones del mundo aparentemente encontradas, aunque no contradictorias.

Y subyace en el pensamiento newtoniano algo mucho más sutil. Por oposición a Aristóteles, para quien el movimiento es un proceso, Newton muestra que éste, al igual que el reposo, es un estado. Más aún, ambos son intercambiables según sea el sistema de referencia que se tome, como lo insinuara Galileo con su principio de relatividad.

Finalmente digamos que la metafísica mecanicista cartesiana reaparece en los temas vinculados con el calor a través de Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). Al igual que Mayer, Boltzmann es incomprendido y rechazado pero a diferencia de aquél, su vida terminó trágicamente.

Primera conclusión

En la segunda década del siglo XX Percival Lowell predijo la existencia de Plutón y en 1930, ya desaparecido, su ayudante Clyde Tombaugh lo verificó experimentalmente en el lugar predicho. Lowell había aplicado la mecánica newtoniana.

En 1969 las ecuaciones de Newton fueron puestas nuevamente a prueba por la NASA con el envío de los primeros astronautas a la luna. El 20 de julio, a las 15.18 hora de Houston, los ingenieros de la NASA lanzaron un suspiro de alivio y seguramente Neil Amstrong se debe de haber acordado de Newton.

No fue necesario Einstein para llegar a la luna.

Por otro lado, cuando tomo la tiza para escribir en el pizarrón, la encuentro donde está, con certeza. Heisenberg tampoco es necesario.

La penetración cultural de la visión newtoniana nos ha llevado a hablar del efecto palanca en economía, del equilibrio entre oferta y demanda y de ver el valor agregado como un bien apetecible que ignora la entropía que acompaña a su producción. Además, se habla de la inercia de los indicadores económicos. Entretanto, las conclusiones de Clausius son válidas universalmente y no reconocen excepción tanto en el mundo inanimado como animado.

Para lo cotidiano, nos quedamos entonces con Newton y Clausius.

Hemos llegado, así, a dos mundos en la explicación del uso de la energía: el newtoniano, válido en los molinos, y el termodinámico, válido en las máquinas térmicas.

Cabe agregar que estas máquinas fueron aumentando continuamente su rendimiento junto con el consiguiente incremento de productividad de bienes y servicios, llevándonos a la conclusión de que progreso y mayor eficiencia van de la mano. Pero ¿es ello realmente así? Cabe pues preguntarse: si comparamos el mundo anterior a la Revolución Industrial con el actual ¿cuál es termodinámicamente más eficiente?

A simple vista ésta pareciera ser una pregunta pueril. ¿Lo es efectivamente?

Veámoslo. Nadie duda que la producción y productividad de bienes y servicios ha venido creciendo continuamente. Dicho en términos más ortodoxos: la producción de bienes y servicios por unidad de los factores de la producción aplicados, aumenta en función del tiempo.

¿Ocurre lo mismo con el consumo de energía por unidad de energía contenida en tales bienes y servicios?

Segunda Parte

Civilización y Termodinámica

Producción, productividad y eficiencia en el agro⁶

Pensemos en llevar una hogaza de pan a la mesa familiar.

Antiguamente, la cadena de la producción de pan arrancaba con la siembra del trigo, hecha con un arado tirado por el hombre o por bueyes, le seguía la cosecha manual y la selección y molienda del grano también manual o, en el mejor de los casos, efectuada la última en un molino hidráulico. Luego, el amasado manual y la cocción de la masa en el horno doméstico calefaccionado a leña. Y ya estaba el pan en la mesa.

Veamos cuál es esta secuencia hoy en día, en una urbe de un país industrializado:

1. Se ara la tierra con un tractor.
2. Se siembra el trigo con una máquina.
3. Se aplican fertilizantes y plaguicidas con ayuda mecánica.
4. Se cosecha el grano con una cosechadora y se lo embolsa mecánicamente.
5. Las bolsas se cargan en un camión mediante cintas transportadoras.
6. Se las transporta en camiones a un molino mecánico donde el grano se transforma en harina.
7. La harina se embolsa mecánicamente y transporta a una panificadora.
8. En la misma, la harina es refinada y blanqueada.
9. La harina se enriquece con niacina, hierro, tianina y riboflavina.
10. Se adiciona propionato de calcio como preservante y acondicionador.
11. Se prepara la masa en una amasadora mecánica.
12. Se hornea el pan en un horno eléctrico o a gas.
13. Se lo envasa mecánicamente en un envoltorio con texto impreso.
14. Las cajas conteniendo las unidades envasadas se transportan en camiones a un supermercado con aire acondicionado, iluminación, etc.
15. El cliente va en su automóvil a comprar el pan.
16. De regreso a su casa eventualmente lo introduce en una tostadora eléctrica.

Obviamente, detrás de esta secuencia se tiene un determinado consumo de combustible para mover los motores involucrados. Además se tiene el consumo de energía en las industrias

metalmecánica y química involucradas en la fabricación de las maquinarias y los productos químicos empleados en esta cadena de producción, transporte, distribución y despacho. Todo ello hace que se consuma mucha más energía que la que contiene el producto final, en este caso la hogaza de pan.

La civilización ha traído consigo un incremento descomunal en la eficiencia de producción de bienes y servicios. Paradójicamente, en el mundo de la termodinámica, el efecto ha sido el inverso.

Recapitulemos un poco

El enorme aumento de producción y de productividad del agro moderno se ha producido sobre la base de un consumo cada vez mayor de petróleo como fuente primaria de energía. Ello ha llevado a que, desde el punto de vista termodinámico, la agricultura moderna sea la menos eficiente de la historia. Dicho de otro modo, consume mucho más energía por unidad de energía producida que en cualquier otra época. Veámoslo.

Antes de la era industrial, un campesino producía 10 calorías por cada caloría que gastaba. Si se considera el consumo de energía humano, el "avance" de la era industrial es fenomenal pues hoy se producen 6.000 cal por cada caloría humana consumida. Pero el panorama cambia cuando se computa el total de la energía empleada (hombre más máquinas). En efecto, para producir una lata de cereales de 270 calorías se consume un total de 2.790 calorías. Dicho de otro modo, por cada caloría producida se gastan diez. La eficiencia termodinámica se ha reducido, por lo tanto, unas 100 veces.

Pero también hay que decir que en Estados Unidos un trabajador medio compra hoy una semana de uso de gasolina y electricidad con 90 minutos de trabajo. En 1920 necesitaba en cambio un día entero.

Este es el mundo de Clausius; Newton no participa del mismo.

Si cada vez debemos consumir más energía para obtener utilidades menores en producción energética neta, ello significa que hemos entrado en la zona de los rendimientos marginales como era el caso antes de la Revolución Industrial. Por ejemplo, entre 1945 y 1970 los productores de cereales estadounidenses aumentaron un 400% su consumo de energía para elevar su producción en un 138%. Entre 1945 y 1965 todo el agro aumentó un 70% el consumo de energía para lograr un incremento de producción del 30%.

La producción agrícola destinada al ganado es la que más energía consume. Para pro-

ducir medio kilogramo de carne de ganado alimentado a pienso, se requieren 4 litros de gasolina. La carne que consume anualmente una familia tipo de cuatro personas gasta casi 1000 litros de combustibles fósiles que a su vez se traducen en 2,25 toneladas de dióxido de carbono (equivalente a lo que emite un coche medio en seis meses de funcionamiento normal).

Ahora bien, la era del petróleo ha terminado moldeando una determinada arquitectura social, gran parte de la cual depende de su existencia y que en su mayor proporción pasa desapercibida a nuestra atención. En efecto, ante un desabastecimiento de petróleo nuestra primera reacción es ir a una estación de servicio a llenar el tanque de combustible del automóvil, como si ése fuera el único problema.

Hay sin embargo en la sociedad moderna otras actividades petróleo dependientes más vitales. Veámoslas.

Vía alimentos, la agricultura es la fuente básica de energía para el hombre que permite mantener la sociedad industrial en un estado de desequilibrio. Lo curioso es que esto no cambió con la Revolución Industrial. Pero, lo repetimos, la moderna agricultura depende casi exclusivamente del petróleo.

Los grandes excedentes alimentarios y la liberación de mano de obra campesina hicieron posible la irrupción industrial del siglo XX y, luego, la aparición de los servicios y la información como parte importante de la economía.

En una sociedad industrial por excelencia como lo es la estadounidense, la producción de alimentos consume el 47% del total de la energía, pero el transporte, procesamiento y distribución de los mismos agrega un 10 a 13% más. Dicho de otro modo, para llevar los alimentos a la mesa se consume un 57-60% de la energía total que emplea la sociedad. Obviamente, a medida que nos movemos hacia sociedades menos industrializadas dicho porcentaje va disminuyendo.

Si en la primera mitad del siglo XX el agro asistió a una revolución mecánica, la segunda mitad fue testigo de una revolución química a través de fertilizantes, plaguicidas y pesticidas, todos de origen petroquímico.

En 1850, el 60% de la mano de obra estadounidense se ocupaba del agro; hoy lo hace el 2,7%. En 1850 un agricultor producía alimentos para cuatro personas, hoy lo hace para setenta y ocho.

Una ciudad con un millón de habitantes necesita más de 1.800 toneladas de alimentos, 567.000 toneladas de agua dulce y 8.600 toneladas diarias de combustible.

A todo esto, insistimos en que puede parecer paradójico que la eficiencia termodinámica de un sistema disminuya a medida que avanza la civilización cuando, al mismo tiempo, la eficiencia de las maquinarias va en aumento. Esto último es indudablemente cierto. Pero ocurre que el sistema mismo se hace cada vez más complejo a medida que la civilización avanza.

El tema de la colocación del alimento en la mesa hogareña que hemos visto es un buen ejemplo al respecto. De antiguo, casi no había etapas intermedias para pasar de la producción al consumo final. Prácticamente todo quedaba en el seno del hogar campesino. La primera complicación se da con el fenómeno de la urbanización.

Y hoy el sistema de producción, transporte y distribución del alimento es una compleja red caracterizada por la preponderancia de los servicios por sobre la producción misma.

En consecuencia, poco vale que algún nodo de dicha red haya aumentado su eficiencia. Cuando uno efectúa el balance macroscópico de energía térmica sobre toda la red y lo compara con el de antaño concluye que la eficiencia global es menor, mucho menor. Dicho de otro modo, la complejidad creciente del sistema es la que hace que un aumento de producción se logre a expensas de un incremento proporcionalmente mayor de energía y ello vale para cualquier producto en el mundo industrializado. En respuesta a los griegos diríamos que la naturaleza nos pasa su factura por tratar de engañarla.

Hay otra cuestión no menos relevante referida al alimento, portador energético de nuestra subsistencia. En tal sentido, dos aspectos merecen subrayarse: 1) su origen primario sigue siendo la tierra, como antes aun del Neolítico, 2) por más que hoy estemos rodeados de productos y materiales de origen industrial, el alimento, en esencia, sigue siendo un producto natural. Las proteínas, carbohidratos y grasas no se fabrican, son un producto de la vida misma. El consumo energético del hombre es el mismo cuando habitábamos cavernas que cuando estamos en un rascacielos: 2.000-3.000 kcal/día cápita.

El consumo periférico de energía⁷

Termodinámicamente hablando, la vida es un fenómeno anentrópico, esto es, crea orden. Pero, dada la vigencia de los dos Principios, el ser vivo como sistema genera en el medio mucha más entropía que la energía que consume. A su vez, ello se exalta en comunidades organizadas como las de hormigas o abejas. Allí el sostenimiento de la vida requiere un despilfarro de energía.

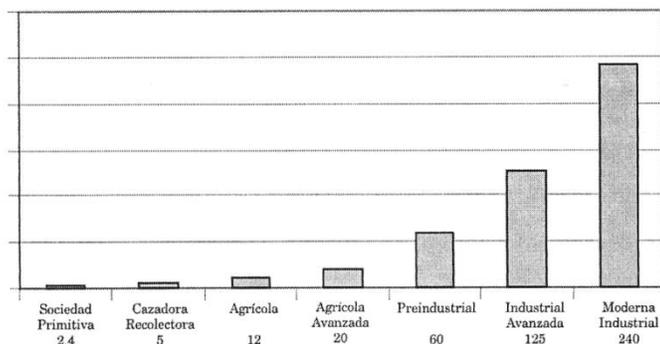


Fig. 1. Consumo de energía y evolución, miles kcal/persona.día

Si ello vale para animales, ¿cuánto más lo será para el hombre, creador de una civilización? Veámoslo.

La situación descrita precedentemente ha llevado a un crecimiento del consumo de energía como el que vemos en la Figura 1.

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

En tanto, del consumo alimentario (mantenido prácticamente constante) 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.

Por otra parte, desde la sociedad primitiva preneolítica hasta la época agrícola avanzada previa a la Revolución Industrial (con sus molinos y bueyes), el incremento del consumo energético había sido de unas 8,33 veces.

Como en dicha época la energía de origen mecánico representaba el 6% del total, entonces, la misma significaba un aumento de 0,5 veces. Teniendo en cuenta nuevamente que el hombre aprovecha el 20% de su dieta como tracción a sangre, ello implica que los molinos le proveían a cada individuo la mano de obra equivalente a dos personas y media. A la sazón, era mano de obra que el agro liberaba y que podía incorporarse a la ciudad y a la industria.

A partir de allí, la Revolución Industrial, las nuevas máquinas y los combustibles fósiles generaron el equivalente de aquel ejército de 500 individuos al que aludíamos anteriormente.

La energía de la tracción a sangre de estas 500 personas es hoy aportada fundamental-

mente por la energía de los recursos fósiles. Comparemos pues el costo de una y otra fuente.

Tracción a sangre, petróleo y sus costos

Si un trabajador expresara su salario en términos de la energía que consume en su tarea y si comparara dicho valor con el que surgiría de producir la misma con petróleo, llegaríamos a que, si el salario es de 1000 u\$s/mes y el precio del petróleo es de 40 u\$s / bbl, entonces la energía fósil habría de generar un ahorro del orden de unas mil veces¹.

Esta es la causa, razón de ser y explicación del éxito de la energía fósil en el mundo moderno.

Ahora bien, el crecimiento de la demanda energética D depende del aumento de población P y del desarrollo económico. Este último puede a su vez expresarse en función del desarrollo económico propiamente dicho DE y de la intensidad energética IE (velocidad de consumo de la energía por unidad de riqueza generada), de modo tal que $D [kW] = P[hab] \cdot DE [PBI/hab] \cdot IE [kW/PBI]$.

La previsión de crecimiento demográfico para los próximos años es de un 1,2% anual y el del PBI per cápita es de un 2,3% anual. Ello hace que se prevea un crecimiento de la economía mundial de $1,012 \times 1,023 = 1,035$, es decir, un 3,5% anual.

Ahora bien, la mejora en eficiencia energética permite suponer una reducción de la intensidad energética en un 2%. Por lo tanto, ello reduce el crecimiento de la demanda energética en $1,035/1,02 = 1,015$, es decir un 1,5% anual. Se

¹El cálculo se da en el Apéndice.

prevé que dos tercios de este crecimiento proveniría de los países en desarrollo.

De todos modos, es interesante consignar las fuertes desigualdades del consumo energético según países, como se ve seguidamente.

Consumo energético, bpe *per cápita*

Estados Unidos	60
Japón	30
Nigeria	0,8

donde bpe indica barriles de petróleo equivalente.

Los países desarrollados representan el 15% de la población mundial pero consumen la mitad de la energía producida. A su vez, un tercio de la población mundial vive en la indigencia y no tiene acceso a las formas comerciales de energía que emplea el resto, limitándose a emplear biomasa bajo la forma de leña.

El consumo actual de energía supera los 210 millones bpe/día o 14,4 millones MW. Con un crecimiento demográfico anual del 1,2% y de la demanda energética del 1,5% y manteniendo la inequidad antedicha, serían necesarios 400 millones bpe/día para el año 2050, o 25 millones MW. Tengamos en cuenta que un millón MW equivale a 1.430 plantas de 700 MW.

A su vez, para eliminar la inequidad antes citada, hoy mismo se necesitarían 500 millones bpe/día o 38 millones MW y para lograrlo en el 2050 harían falta casi 70 millones MW o un billón bpe/día.

Esto da una idea del enorme desafío que se nos plantea de cara al futuro.

Conclusión

El carbón mineral, además de su uso como combustible, inauguró la era de los productos industriales orgánicos sintéticos vía la carbo-química (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 alimentan tanto a aviones como barcos, automóviles, tractores, calderas o centrales térmicas. A su vez, Newton y Clausius siguen discutiendo.

En el ocaso del Imperio Romano, se había ingresado en la etapa de los retornos decrecientes. El resultado fue la Edad Media que, con su estancamiento, sorteó el problema. Pero la recuperación vino a partir del año 1000 y con ello,

algo de crecimiento. Hasta volver a los retornos decrecientes. Pero apareció la Revolución Industrial y se produjo el gran salto.

Dicho esto en términos más conceptuales, observamos que a lo largo de la historia, cuando el hombre disponía de una dada tecnología, buscó aumentar la producción asignando una mayor dosis de los factores de la misma.

Esto le podía llevar a dos consecuencias: 1) que uno o más de tales factores llegaran a un límite (fue el caso de la madera en la Edad Media), 2) que se llegara a la zona de los retornos decrecientes. Esta barrera sólo podía superarse mediante una innovación tecnológica que aumentara la productividad (mayor producción para igual asignación de los factores de la producción). Fue lo que ocurrió con la Revolución Industrial: un nuevo combustible junto con la mecanización de la industria.

Hasta que el panorama vuelve a repetirse.

El tema, el gran tema, es seguir encontrando el alimento energético y/o la innovación tecnológica salvadora que puedan sostener esta tendencia.

Teilhard de Chardin observó que la flecha de la evolución de las especies corre paralela a la "complejificación" (ésta fue su palabra) del sistema nervioso central. Del mismo modo, la flecha de la evolución de la civilización corre paralela a la complejidad de los sistemas y a la disminución de su eficiencia termodinámica.

Además, hay algo para reflexionar en lo referido a eficiencia de producción y eficiencia termodinámica.

Hemos dicho que, con el avance de la civilización, la primera eficiencia ha ido en continuo aumento mientras que con la segunda ocurría lo contrario.

Ahora bien, con relación a los seres vivos, eficiencia de producción es sinónimo de eficiencia seminal, se trate de polen, semillas o espermatozoides. Y en tal sentido hay que observar que tal eficiencia es más que mínima: por cada ser vivo que se genera hay una multitud de individuos seminales que se pierden.

En tanto, termodinámicamente hablando, la vida es un fenómeno anentrópico.

Pareciera que ésta fuera un desesperado alzamiento de la materia inanimada contra el destino ineluctable de la entropía. Y que, para ello, la eficiencia productiva debe ser mínima.

Todo lo contrario de lo que el hombre ha logrado con la industrialización: a mayor eficiencia productiva, menor eficiencia termodinámica.

Más aún, desde que la economía existe como ciencia, el problema económico ha sido la productividad. Precios, ocupación y salarios se encadenan tras la misma. En tal sentido, la Revolución Industrial fue el ejemplo virtuoso más explosivo que haya conocido la humanidad.

Teoría económica y productividad van de la mano independientemente de cuánta energía se gaste por unidad de energía contenida en el bien producido.

Mayor productividad parece ser mayor entropía. Justo a la inversa de lo que nos anuncia la vida.

¿Qué revancha se esconderá detrás de este sino?

La Revolución Industrial impuso una nueva fuente de energía primaria que hoy domina el panorama: la fósil. 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, mejor y acorde con ellas.

Menuda tarea la de los que nos siguen y deban pensar en ello.

Apéndice

Aceptemos que un asalariado expresa su contraprestación laboral en calorías (480 kcal/día). Si, como tal, percibe 1.000 u\$s/mes para una contraprestación de ocho horas diarias, 22 días al mes, ello significa que su costo horario es de 5,7 u\$s/h.

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

Ello significa que su costo laboral energético es de $(5,7 \text{ u}\$/\text{h}) / (20 \text{ kcal/h}) = 0,28 \text{ u}\$/\text{kcal}$.

Por otro lado, a un precio de la energía fósil de 40 u\$s /bbl pe, tendríamos $40 \text{ u}\$/\text{bbl pe} \cdot 7 \text{ bbl pe/ton} / 106 \text{ kcal/ton} = 2,8 \times 10^{-4} \text{ u}\$/\text{kcal}$.

Por lo tanto, la energía fósil genera un ahorro de $0,28 / 2,8 \cdot 10^{-4}$, esto es, unas mil veces.

Bibliografía consultada

- Brunhes, B. *La Dégradacion de L' Energie*, Flammarion, Paris, 1909.
- Cunningham R.E., *La Energía. Historia de sus Fuentes y Transformación. Civilizaciones y Termodinámica*, IAPG, Buenos Aires, 2004
- Derry, T.K., *Historia de la Tecnología*, Vol. III, Siglo Veintiuno Editores, Madrid, 1977.
- Guillen, M., *Cinco Ecuaciones que Cambiaron el Mundo*, Ed. Debate, Madrid, 1999.
- Mason, S.F., *Historia de las Ciencias*, Vol. 3, Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- Rifkin, J., *La Economía del Hidrógeno*, Paidós, Buenos Aires, 2003.
- Tyler Miller, G. Jr., *Energetics, Kinetics and Life*, Belmont, C.A., Words, 1971.
- Wrigley, E.A., *Cambio, Continuidad y Azar*, Ed. Crítica, Barcelona, 1992.

Trabajo recibido y aceptado en agosto de 2005.