

MÁQUINAS ALGÉBRICAS

POR

DON LEONARDO DE TORRES Y QUEVEDO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1).

I

Una máquina algébrica es un aparato que impone entre los valores simultáneos de diferentes elementos las relaciones expresadas matemáticamente en una fórmula analítica. Todo aparato que permita reproducir á voluntad un fenómeno físico, cuyas leyes estén formuladas matemáticamente, puede en rigor denominarse máquina algébrica.

Algunos ejemplos lo pondrán claramente de manifiesto.

En el movimiento oscilatorio del péndulo simple existe cierta dependencia entre el tiempo que dura una oscilación y la longitud del péndulo: el tiempo es proporcional á la raíz cuadrada de la longitud. Esta última se determina de ordinario directamente, midiéndola, y la fórmula que expresa la ley del fenómeno se utiliza para calcular la frecuencia de las oscilaciones. Pues, inversamente, un péndulo dispuesto de modo que pueda hacerse variar su longitud, serviría para obtener, sin cálculo ninguno, la raíz de un número cualquiera: bastaría darle la longitud expresada por este número y medir cuánto dura una oscilación.

La temperatura de una cierta cantidad de aire ó de otro gas perfecto, es proporcional al producto del volumen por la presión. Imaginemos un cuerpo de bomba, con un émbolo perfectamente ajustado, que corre á lo largo de él; una escala graduada, para indicar la posición del émbolo, ó, más bien, el volumen ocupado por el gas; y, por último, un manómetro y un termómetro, para acusar la presión y la temperatura.

¿Queremos efectuar una división? Calentando ó enfriando el aire y cargando en el émbolo más ó menos peso, haremos que se lean al mismo tiempo los valores del dividendo y del divisor: el primero en el termómetro, y en el manómetro el segundo. El valor del cociente ha de ser igual al volumen ocupado por el aire, y se leerá en la escala graduada.

Y así podríamos multiplicar los ejemplos tanto como se quiera.

En general, cada uno de los elementos de un fenómeno sometido á leyes matemáticas está representado por una variable, y las variables todas están sujetas á ciertas condiciones indicadas en una fórmula, á la cual—por ser ella expresión de la ley del fenómeno—satisfarán constantemente los valores simultáneos de todos los elementos.

Esta circunstancia permite deducir de los valores de algunos de entre ellos, que sean conocidos, los que corresponden á los otros, y determinar así, por medio del cálculo, ciertas magnitudes, sin necesidad de medirlas directamente. Pues lo mismo permitirá, procediendo á la inversa, sustituir á un cálculo un experimento: los datos que habian de servir para efectuar el cálculo determinarán las condiciones en que el experimento ha de verificarse; siendo preciso que, al producirse el fenómeno, cada elemento correspondiente á una de las variables conocidas alcance el valor que á esta variable se atribuye, para que entonces, midiendo los elementos restantes, obtengamos directamente el valor de las incógnitas.

Así se explica la gran variedad de máquinas propuestas. Sistemas de balanzas más ó menos complicados, aparatos hidráulicos, aparatos eléctricos, y otros muchos, fundados en muy diferentes principios, se han propuesto con frecuencia; pero el tipo que más abunda es el de las máquinas puramente cinemáticas, en las cuales se utilizan para efectuar los cálculos ciertas relaciones, establecidas por medio de enlaces mecánicos, entre

los valores simultáneos de los espacios recorridos por diferentes móviles.

Y es natural esta preferencia; la Cinemática presenta ventajas incontrovertibles, y sólo de ella pueden esperarse soluciones generales en la construcción de máquinas algébricas. Fijémonos en el ejemplo del aire comprimido. ¿Quién fabricará escalas, manómetros y termómetros que midan con precisión bastante los volúmenes, las presiones y las temperaturas? ¿Quién ajustará el émbolo, de suerte que no escape nada de aire? ¿Quién vencerá, en suma, las mil dificultades técnicas que se presentarían al construir el aparato?

Y sobre todo, aun admitiendo que pudieran vencerse, ¿quién malgastaría su tiempo y su trabajo en manejar este artefacto, abandonando el procedimiento usual, mucho más rápido, cómodo y exacto?

Pues análogas y aun mucho mayores dificultades se encontrarían de ordinario en las aplicaciones.

La intensidad de un campo magnético, la presión de un fluido, la longitud de una onda sonora ó luminosa, y, en general, casi todos los elementos que figuran en las fórmulas de la Física, ni pueden medirse con aproximación suficiente, ni se prestan de ningún modo á la representación adecuada de las variables. Además, no todos los fenómenos físicos pueden reproducirse con facilidad á cada momento, ni encontraremos siempre un fenómeno cuya ley esté expresada por la fórmula que deseamos calcular.

II

En las máquinas cinemáticas se suprimen algunos de estos inconvenientes y se aminoran los otros. La construcción de fórmulas analíticas no ofrece, en pura teoría—cuando á ellas se acude,—dificultad ninguna. Plantear el problema en términos precisos es casi resolverle, y se plantea por sí mismo sólo con definir las máquinas cinemáticas en forma adecuada, de manera que la definición ponga en evidencia la analogía entre las máquinas y las fórmulas; analogía que no aparece claramente, porque las definiciones generalmente admitidas sólo se aplican, en realidad, á las máquinas industriales.

Los grandes progresos de la maquinaria pusieron de manifiesto, á fines del siglo pasado, la necesidad de estudiar sistemáticamente los diferentes medios empleados para conseguir la transformación de unos movimientos en otros.

Monge en 1794, al plantear la organización de la Escuela Politécnica, proponía que se dedicaran dos meses al estudio de los *elementos de las máquinas* (1); Carnot, poco más tarde, ponderaba la utilidad de estudiar los *movimientos geométricos* (2); y otros hombres de ciencia, cuyos nombres es inútil citar ahora, trataron, más ó menos directamente, de la cuestión que nos ocupa; pero generalmente se estima que Ampère es quien constituyó la teoría de los movimientos geométricos en su *Ensayo sobre la Filosofía de las Ciencias* (3). En este libro se comprenden, bajo un solo nombre, dos teorías distintas, que más tarde han sido estudiadas separadamente por diferentes autores: la *Cinemática Pura* y la *Teoría de los Mecanismos*.

Ampère, después de exponer el concepto general de la Cinemática, define una máquina diciendo que es *un instrumento con ayuda del cual se puede cambiar la dirección y la velocidad de un movimiento dado*; y luego añade: «Resulta así esta definición independiente de la consideración de las fuerzas que obran sobre la máquina: consideración que sólo puede servir para distraer la atención de quien trata de comprender su mecanismo. Para formarse idea clara, por ejemplo, del engranaje que obliga á la aguja de los minutos de un reloj á dar doce vueltas, mientras la aguja de las horas da una sola, ¿es preciso atender á la fuerza que pone el reloj en movimiento? El efecto del engranaje, en cuanto este último establece la relación de velocidad entre

(1) *Essai sur la Composition des Machines*, par MM. Lenz et Bétancourt. Paris, 1808, p. 1.

(2) Carnot (L. M. N.), *Géométrie de Position*. Paris, 1803.

(3) *Essai sur la Philosophie des Sciences* par André-Marie Ampère. Paris, 1834, p. 51.

(1) Discurso leído en el acto de su recepción pública en la Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales. Va precedido de un prólogo que suprimimos para entrar en materia.

»las dos agujas, ¿no es siempre el mismo cuando el movimiento procede de una fuerza cualquiera distinta del motor ordinario, cuando, por ejemplo, se hace girar con el dedo la aguja de los minutos?»

Crítica Willis en su libro *Teoría de los Mecanismos* (1) la definición de Ampère, porque habla ésta, según hemos visto ahora mismo, de la transformación de un movimiento *dado*, es decir, de un movimiento cuya dirección y velocidad sean conocidas; mientras Willis entiende, y con razón, que la máquina se limita á regir las relaciones de velocidad y de dirección entre los dos móviles enlazados por medio de ella; pero que la conexión establecida y sus efectos son independientes de las velocidades actuales.

Tomando al pie de la letra la definición de Ampère, la transmisión citada en su ejemplo serviría para transformar un movimiento determinado (el de la aguja de los minutos), es decir, una rotación cuya velocidad es de una vuelta por hora, en el movimiento de la otra aguja. Willis quiere que la definición no se funde en los movimientos reales, sino en sus relaciones, y por eso, según él dice, la conexión entre las dos agujas del reloj rige la relación de sus velocidades angulares, que han de estar siempre en la proporción de doce á uno, y además impone la condición de que ambas agujas giren en cada momento en el mismo sentido: las dos en sentido directo, ó las dos en sentido inverso. Podrán marchar de prisa ó despacio; con movimiento continuo ó con movimiento alternativo, esto es indiferente; la máquina se limitará á imponer las dos condiciones mencionadas.

Esta crítica no tiene gran alcance, pues se refiere á un error de redacción de Ampère; pero Willis estaba interesado en ponerle de relieve para justificar una nueva clasificación de mecanismos, y yo he querido recordar sus palabras, porque, además de ser muy justas, nos encaminan directamente á nuestro objeto.

La máquina establece una conexión entre dos móviles; Willis la define teniendo en cuenta la relación entre sus velocidades, y nosotros la definiremos teniendo en cuenta la relación entre los espacios recorridos por aquellos móviles. Cada aguja del reloj describe al moverse un cierto ángulo, y los dos ángulos descritos por las dos agujas, medidos á partir de una posición elegida arbitrariamente, estarán en la relación de doce á uno.

Vemos ya á la máquina imponiendo, de una manera mecánica, cierta dependencia entre los valores simultáneos de dos ángulos variables, lo mismo que una ecuación expresa, en lenguaje algébrico, cierta dependencia entre los valores simultáneos de dos variables abstractas. Pero estos ángulos son cantidades muy fáciles de medir por medio de limbos graduados y de contadores que cuenten automáticamente el número de vueltas de cada aguja: podremos, pues, construir un aparato en el cual se leerán directamente los valores simultáneos de los ángulos descritos por las dos agujas, ó, para hablar más brevemente, los valores simultáneos de sus *desplazamientos*, y estos dos valores estarán ligados por una condición, á la cual necesariamente han de satisfacer siempre, cualesquiera que sean los movimientos de la máquina. La ecuación dice que un desplazamiento ha de ser igual al otro multiplicado por doce, y el aparato impone realmente esta condición.

Hemos venido, en resumen, dando un largo rodeo, á considerar las máquinas como se consideran los sistemas materiales en la mecánica racional, y á definir los efectos cinemáticos de los enlaces, formulando las ecuaciones impuestas entre los valores simultáneos de los desplazamientos de diferentes móviles.

Y, en verdad, no es fácil establecer diferencias fundamentales entre los sistemas ideales de la mecánica y las máquinas que se consideran en la teoría geométrica de los mecanismos, compuestas, como dice Bour, de cuerpos ficticios, que sólo tienen las propiedades que nosotros les hayamos atribuido para simplificar la cuestión (2).

Es cierto que en un sistema puede haber un número cualquier

de movimientos independientes, y en una máquina, tal como se ha definido hasta ahora, no habrá nunca más que uno solo: basta conocer el movimiento de un mecanismo determinado para deducir el movimiento de la máquina toda, la cual constituye—como ahora se dice—un sistema de un solo parámetro ó de un solo grado de libertad de movimiento.

Tal limitación, aplicable á las máquinas industriales, que por razones de orden práctico tienen siempre un solo motor, es completamente arbitraria é inaceptable en la teoría de las máquinas cinemáticas, cuyo objeto es resolver con toda la generalidad posible el problema de la transformación de unos movimientos en otros.

Tan cierto es esto, que en realidad casi todos los autores—contradiendo la definición admitida—plantean este problema, aunque sólo de un modo subrepticio, al estudiar las que generalmente se llaman combinaciones de movimiento. Todos recordáis cómo, por medio de los trenes epicicloides, se imponen mecánicamente ciertas condiciones entre los movimientos de tres móviles: cómo se puede hacer, por ejemplo, que el ángulo descrito por uno de ellos sea igual á la suma de los ángulos descritos por los otros dos.

En el aparato así construido no habrá transformación de un movimiento en otro, sino de dos movimientos en uno; y podrá encargarse un experimentador de cada uno de los móviles que representan los sumandos y hacerle marchar á su antojo: los enlaces mecánicos arrastrarán al otro móvil, obligándole á marchar en tal forma que los valores simultáneos de los tres desplazamientos satisfagan siempre á la ecuación impuesta, y el desplazamiento de móvil, arrastrado por los enlaces, será constantemente igual á la suma de los dos desplazamientos que hayan determinado de un modo arbitrario los dos experimentadores.

A cierta combinación de ruedas dentadas, que establece entre dos móviles una conexión, en virtud de la cual el desplazamiento de uno de ellos ha de ser doce veces mayor que el del otro, damos el nombre de máquina; pues máquina es igualmente otra combinación de ruedas en virtud de la cual el desplazamiento de un móvil ha de ser igual á la suma de los desplazamientos de otros dos, y máquina llamaremos también, para ser lógicos, á toda combinación más ó menos complicada de mecanismos, que enlace un número cualquiera de móviles y establezca cierta dependencia entre ellos. Por eso, en la Memoria que informásteis benévolamente el año 94 (1), propuse esta definición: *una máquina es un instrumento que enlaza varios móviles é impone mecánicamente ciertas relaciones entre los valores simultáneos de sus desplazamientos.*

III

No es difícil ya imaginar la disposición general de una máquina algébrica, que sólo se diferenciará de otra cualquiera en ciertas particularidades de orden práctico, y especialmente en las disposiciones adoptadas para que puedan leerse con facilidad los valores de los desplazamientos.

Se compondrá de varios cuerpos, fijos los unos y móviles, con relación á éstos, los otros, distinción puramente empírica, pues no hay ó no sabemos que haya cuerpos en reposo absoluto, y cualquier Tolomeo de la relojería podría explicar el movimiento de un reloj, suponiendo quieta una de las agujas, mientras giran alrededor de ella la esfera y la caja, arrastrando todas las ruedas, convertidas en otros tantos epiciclos. Pero, en la práctica, la distinción se impone casi siempre: así, cuando hablamos de los movimientos de un reloj suponemos todos implícitamente que la esfera permanece inmóvil, y á nadie le ocurrirá, de seguro, explicar el movimiento de un torno ó de una máquina de coser suponiendo que el pedal está quieto y que la máquina toda oscila.

(Se continuará.)

(1) *Principles of Mechanism* by Robert Willis. London, MDCCCXLI, p. XIII.

(2) *Cours de Mécanique et Machines*, par M. Edm. Bour. Paris, 1865, p. 15.

(1) *Memoria sobre las Máquinas Algébricas.*