LOS INICIOS DE LA COMPUTACIÓN ASTRONÓMICA

Luis Felipe Rodríguez Jorge

Introducción

Si definimos la computación como "el procesamiento de datos mediante reglas matemáticas con el fin de obtener un resultado", concluiremos que la vida está llena de computaciones. Si cuatro amigos vamos a comprar helados que cuestan 40 pesos cada uno, habrá que pagar un total de 160 pesos. Si 30 por ciento de los mexicanos tenemos sobrepeso (en parte por comer demasiados helados), como la población es de 120 millones esto quiere decir que 36 millones de mexicanos deberíamos de hacer más ejercicio y comer más saludablemente. En la ciencia, la computación puede realizarse sobre cantidades inmensas de datos, utilizando operaciones matemáticas que van mucho más allá de las cuatro básicas: suma, resta, multiplicación y división. Igualmente, podemos definir la astronomía como el estudio y el conocimiento de los cuerpos y fenómenos que ocurren fuera de la Tierra. Para los primeros seres humanos, el conocimiento astronómico proporcionaba la posibilidad de orientarse mediante los astros. La misma palabra *orientar* viene de *oriente,* el punto cardinal por donde el sol y las estrellas parecen emerger del horizonte. Los marinos fenicios se orientaban con la constelación de la

Osa Menor (*Ursa Minor*), la cual está al norte e incluye a la estrella polar (*Polaris*) que en la actualidad marca aproximadamente el norte (figura 1).

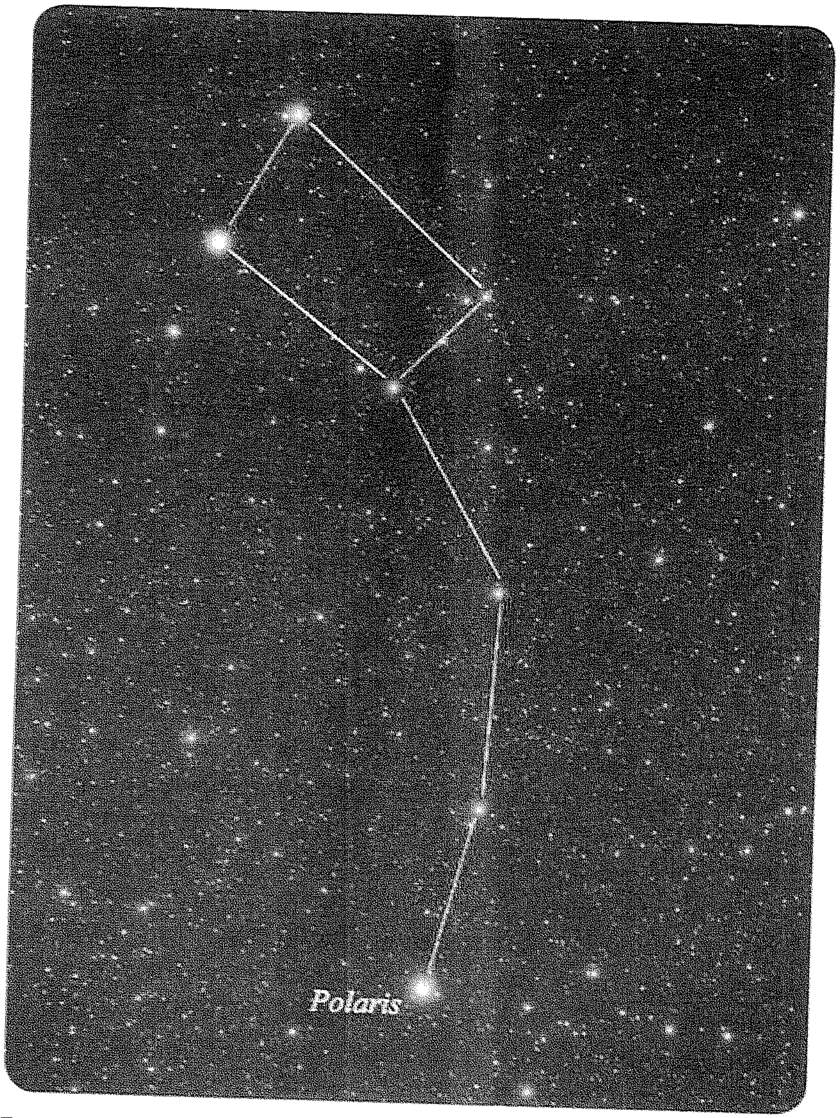


FIGURA 1. La constelación de la Osa Menor. La estrella polar (Polaris) forma parte de esta constelación que era usada por los marinos fenicios para orientarse en la mar.

El conocimiento astronómico también les permitía ubicarse en el tiempo. La repetición de la salida del sol define un día, mientras que la repetición de la luna llena (cada 29.5 días, llamado *período sinódico*) define aproximadamente un mes. Así, si el jefe de una tribu nómada decía que iniciarían un nuevo desplazamiento en dos lunas, los miembros de la tribu sabían que tenían unos 59 días para prepararse. Más aún, la posición de las constelaciones en el cielo les permitía saber en qué estación del año se encontraban, lo cual permitía planear la agricultura y, en zonas geográficas de clima frío, iniciar la cosecha y almacenamiento de alimentos. La aparición de la constelación de Orión al atardecer indica que el invierno se avecina para el hemisferio norte.

Las civilizaciones pioneras

El más antiguo artefacto que se conoce para realizar computaciones astronómicas es conocido como el mecanismo de Antiquitera, descubierto en 1902 como parte de un antiguo naufragio cerca de la isla griega con ese nombre. Se cree que data de alrededor de 100 a. C. y es un complejísimo conjunto de engranajes de bronce que permite predecir la posición futura de los astros más brillantes (figura 2). En un homenaje a este artefacto, la compañía suiza de relojes Hublot produjo una edición limitada de 20 relojes de pulsera de titanio que reproducen el mecanismo; cada reloj puede conseguirse por unos 270 000 dólares.

El mecanismo de Antiquitera es un ejemplo de lo que se conoce como una *computadora analógica*. En una computadora o, en general, en un dispositivo analógico, las cantidades varían de manera continua. En contraste, un dispositivo digital maneja las cantidades de manera discreta o, como se dice a veces, *cuantizada*, o sea con valores discretos, generalmente 0 y 1. Para dar un ejemplo más cercano al lector podemos pensar en los relojes de manecillas en los que estas se deslizan de manera continua en la carátula. En contraste, tenemos los relojes digitales que saltan cuánticamente de un segundo al siguiente (figura 3). En el caso de las computadoras podemos enlistar las diferencias principales entre computadoras analógicas y computadoras digitales.

Comparación entre computadoras analógicas y digitales

Computadora	Analógica	Digital
Cantidades manejadas	Continuas	Discretas (0 y 1)
Necesidad de memoria	No	Sí
Velocidad	Lenta	Rápida
Exactitud	Alta	Truncamiento
Versatilidad	Especializadas	Uso general

En la actualidad los dispositivos digitales han ido sustituyendo a los analógicos. En la vida diaria quizá el ejemplo más impactante sea la desaparición de los discos de acetato (analógicos) a favor de los discos versátiles digitales (DVD, obviamente digitales) donde la música está codificada mediante ceros y unos. Sin embargo, aún el día de hoy existen quienes argumentan que los discos de acetato son superiores en ciertos aspectos a los medios digitales, por ejemplo cuando el sonido es muy bajo y se puede oír que la música *brinca* ligeramente de un nivel a otro de volumen, sin la transición que se mantiene más continuada de los discos de acetato.

En América fue la civilización maya la que alcanzó mayores logros en la astronomía en las épocas prehispánicas. Para lograrlo, los mayas contaban con un poderoso sistema numérico posicional de base vigesimal (de base 20 en comparación con el decimal, de base 10, que usamos ahora).

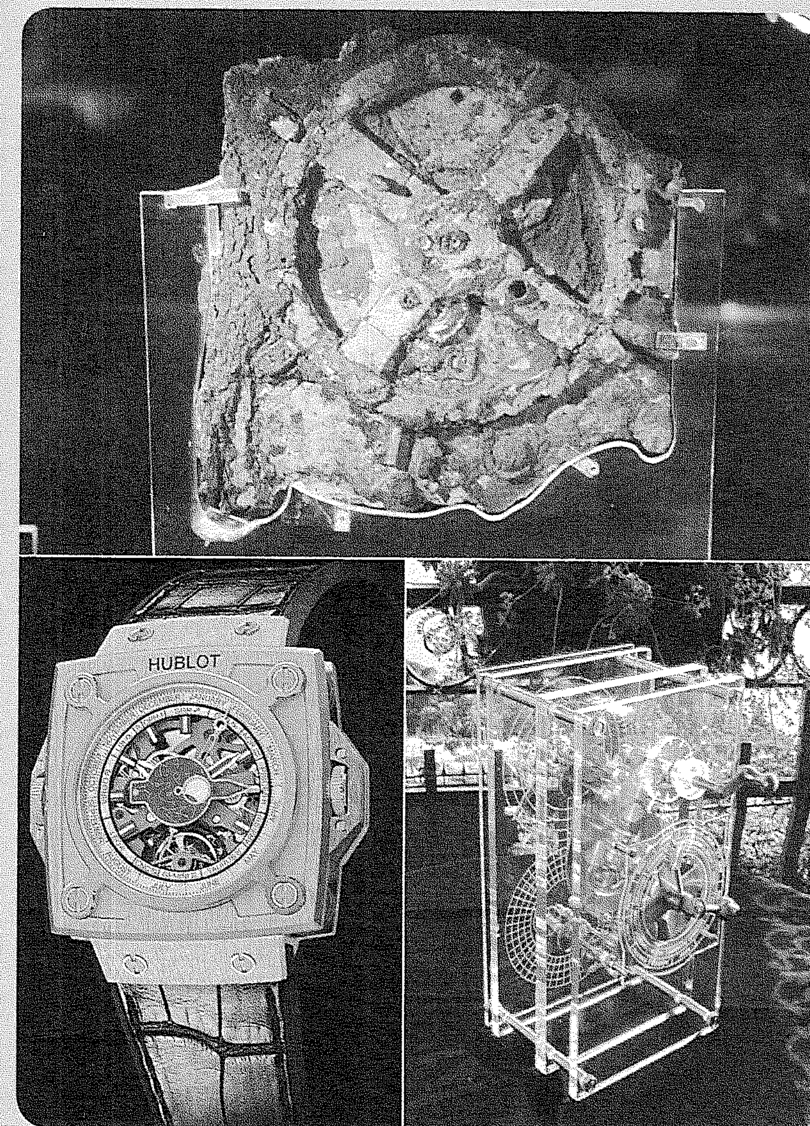


FIGURA 2. Arriba, el mecanismo de Antiquitera como se muestra en el Museo Arqueológico Nacional de Atenas. Su tamaño es de aproximadamente 20 centímetros. Abajo a la derecha, una posible reconstrucción moderna de cómo funcionaba el mecanismo. Abajo a la izquierda, el reloj Hublot, que reproduce parte de las funciones del mecanismo de Antiquitera.

Figura 3. Reloj analógico (arriba) y reloj digital (abajo).

Además, habían inventado el concepto de cero, aspecto que no tenían las culturas de su tiempo. Los babilonios, por ejemplo, tenían conciencia de la existencia del cero, pero lo representaban dejando un espacio vacío con un símbolo para indicar dicho espacio. Los mayas en cambio sí tenían un símbolo para el cero: una concha de caracol vacía para indicar la ausencia de algo (el caracol), o sea el cero (figura 4).

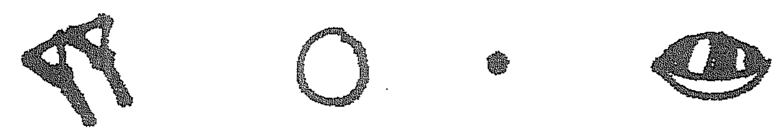


Figura 4. Representaciones del cero en distintas culturas. De izquierda a derecha: babilonia, china, india y maya.

No está claro si los mayas hacían lo que hoy llamamos *computación*, sino que más bien tenían extensas tablas para predecir los ciclos de distintos cuerpos celestes. Tomemos por ejemplo a la luna; con un período promedio de 29.5306 días entre una fase de luna llena y la siguiente. Entonces, llevando una tabla que tuviera una sucesión del siguiente tipo: 29, 30, 29, 30, 29, 30… le acertaríamos a una luna llena por un buen tiempo en el futuro con un margen de error de a lo mucho un día. Esto funcionaría indefinidamente si el período lunar fuese de 29.5 días, pero es de un poco más, de modo que después de aproximadamente 32 ciclos lunares ya estaríamos atrasados por un día en nuestro conteo. La manera en la que los mayas corrigieron esto fue añadiendo cada cierto tiempo dos números 30 consecutivos, de modo que en estas partes la tabla se vería así: 29, 30, 29, 30, 30, 29, 30, etc. Con esta corrección, podemos reusar la tabla de la luna en el *Códice Dresde* por 400 años equivocándonos en menos de un día en la predicción de las lunas llenas.

La motivación de los astrónomos mayas era en buena parte buscar ciclos en los cielos que se repetirían en la vida de los humanos y registrar en el tiempo la fecha de sucesos importantes. Buena parte de su trabajo era manejar los tres calendarios que llevaban de manera simultánea. Es particularmente interesante la llamada *cuenta larga*, una relación continua de los días transcurridos desde una remota fecha en 3114 a. C. Este conteo es equivalente al día juliano que usamos los astrónomos de hoy, el cual inicia el 1 de enero de 4713 a. C. Existe evidencia clara de que la cuenta larga, usada comúnmente en los edificios, desapareció al final del período Clásico maya en 909 d. C. Fue como si al iniciar su decadencia los mayas clásicos perdieran el interés de ubicarse en el tiempo.

De Tolomeo a Copérnico

Desde aproximadamente el año 150 d. C. hasta el siglo XVI la astronomía del mundo entonces conocido estuvo dominada por un hombre, Tolomeo, y su libro, el *Almagesto* ("gran tratado"). Tolomeo, astrónomo griego del siglo II, recopiló y organizó el conocimiento astronómico griego, en especial el proveniente de Hiparco (astrónomo griego del siglo II a. C.) en el *Almagesto*. Este libro describía los movimientos de los planetas y las estrellas, y permitía predecir su posición con considerable exactitud mediante un complejo sistema de círculos, y círculos sobre los círculos, (los famosos *epiciclos*). En el *Almagesto* no existen ecuaciones como las conocemos ahora, sino que se trabaja con demostraciones geométricas, tablas y operaciones de suma y resta de ángulos.

El sistema astronómico de Tolomeo era geocéntrico (con la Tierra como el centro del sistema solar) y para explicar los movimientos retrógrados de los planetas (períodos

en los que se movían en dirección contraria a su movimiento normal) (figura 5) tuvo que crear el sistema de epiciclos, ya mencionados. Uno de los mayores atractivos del sistema copernicano, propuesto en 1543 en el libro *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*, es que al pasarse a un sistema heliocéntrico (con el Sol como el centro del sistema solar), desaparece la necesidad de los epiciclos y el sistema es más sencillo y más cercano a la realidad (figura 5). Para evitar problemas con la Iglesia, revisó y autorizó la publicación de su libro desde su lecho de muerte. Es interesante que el sistema de Copérnico no era más exacto que el de Tolomeo en sus predicciones e hicieron falta otros descubrimientos para convencer a la humanidad de que la Tierra se movía alrededor del Sol y no al revés.

Tycho Brahe y Johannes Kepler

Para principios del siglo XVII el astrónomo danés Tycho Brahe había acumulado un enorme número de precisas observaciones de los movimientos de los cuerpos celestes. Tycho pertenecía a la nobleza y entre las intrigas palaciegas en las que se involucraba como astrónomo imperial y su interés en muchas cosas que incluían la astrología y la alquimia, no encontraba el tiempo para estudiar sus observaciones y tratar de interpretarlas. En 1600 conoció a Johannes Kepler, matemático, astrónomo y astrólogo alemán, lo invitó a visitarlo y a comenzar a analizar los datos que Tycho guardaba celosamente. Tycho murió al poco tiempo, en 1601, y Kepler tuvo entonces acceso a la totalidad de las observaciones de su antecesor.

Kepler dedicó buena parte de su tiempo a analizar las observaciones de Tycho, en particular las de Marte. En 1605 llegó a la conclusión de que tanto Tolomeo como Co-

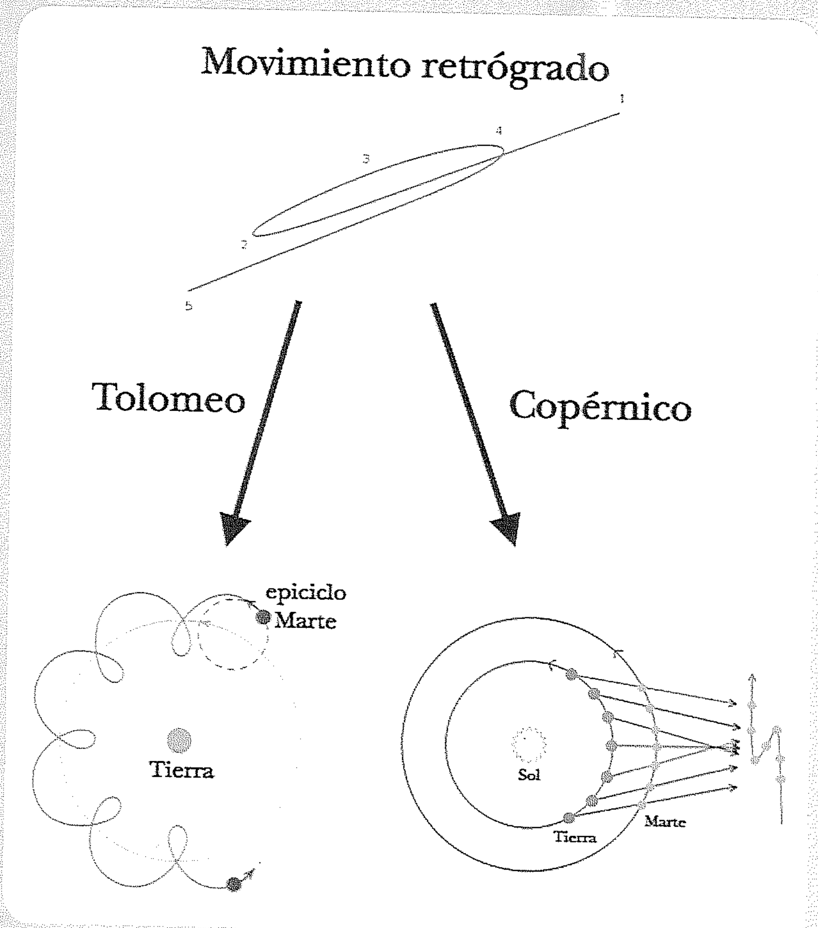


FIGURA 5. Los planetas (arriba) muestran en ciertas épocas un movimiento en el sentido opuesto a su movimiento normal, el cual se conoce como movimiento retrógrado. El sistema tolomeico (abajo a la izquierda) explica esto con el movimiento de los planetas que se mueven alrededor de la Tierra en círculos (epiciclos) encima de otros círculos. El sistema copernicano (abajo a la derecha) lo explica poniendo al Sol en el centro del sistema solar. El movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol es más rápido que el de Marte, y cuando la Tierra "rebasa" a Marte, se produce el movimiento aparentemente retrógrado.

pérnico estaban equivocados en cuanto a la figura geométrica que describía el movimiento de los planetas. No era un círculo —como decía Copérnico—, ni un círculo sobre otro círculo —como decía Tolomeo—, sino una figura algo más compleja: la elipse. Para 1609 publicó su libro *Astronomia Nova* en el que presentaba sus dos primeras leyes del movimiento planetario: 1) los planetas se mueven en órbitas elípticas con el Sol en uno de los focos de la elipse, y 2) el radio que va del Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. En la figura 6 se ilustran las dos primeras leyes de Kepler. No fue sino hasta 10 años después, en su libro *Harmonices Mundi* (armonías del mundo), cuando presentó la tercera ley del movimiento planetario: 3) para cualquier planeta, el cuadrado de su período orbital es directamente proporcional al cubo de la longitud del semieje de su órbita elíptica. El período orbital es el tiempo que tarda un planeta en completar una órbita alrededor del Sol (es un año para la Tierra) y el semieje de una elipse es la mitad de su diámetro mayor. En *Harmonices Mundi*, Kepler enuncia su tercera ley como: "Pero es absolutamente cierto y exacto que el cociente que existe entre el período de dos planetas es precisamente el cociente a la potencia 3/2 de sus semiejes mayores". En aquella época aún no se utilizaban fórmulas matemáticas para expresar las propiedades físicas. En la actualidad simplemente diríamos que si P_1 y P_2 son los períodos de dos planetas y a_1 y a_2 sus semiejes mayores, entonces:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{3/2}$$

Las leyes de Kepler son posiblemente las primeras leyes matemáticas que existieron para describir la naturaleza. Su impacto intelectual fue enorme: el mundo a nuestro alrededor, hasta entonces interpretado en términos de dioses y fuerzas sobrenaturales, era susceptible a una formulación matemática exacta.

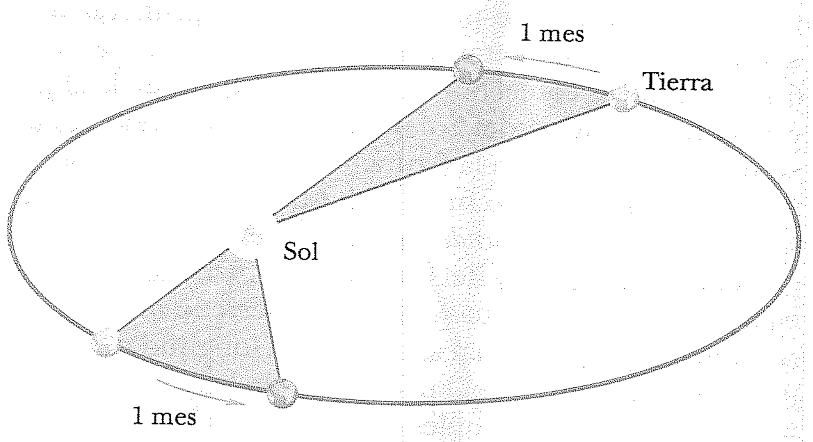


Figura 6. Dibujo que ilustra las dos primeras leyes de Kepler: 1) los planetas se mueven en órbitas elípticas con el Sol en uno de los dos focos de la elipse, y 2) el radio que va del Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. La segunda ley implica que los planetas se mueven más rápido cuando están cerca del Sol para compensar el que el radio es más pequeño.

La manera en la que Kepler llegó a sus leyes fue a través de laboriosas demostraciones geométricas. Pedía a sus lectores que "si sus métodos les parecían tediosos, lo compadecieran porque los había repetido al menos 70 veces". En la figura 7 se muestra parte de la demostración de que las órbitas de los planetas son elípticas (tomada de la *Astronomia Nova*). Tendría que pasar más tiempo para que las ciencias físicas adoptaran las ecuaciones matemáticas como su lenguaje.

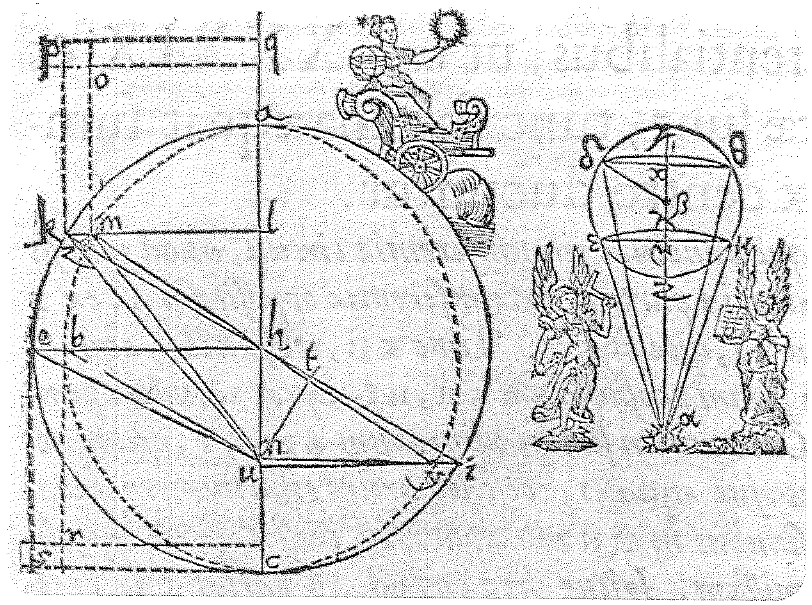
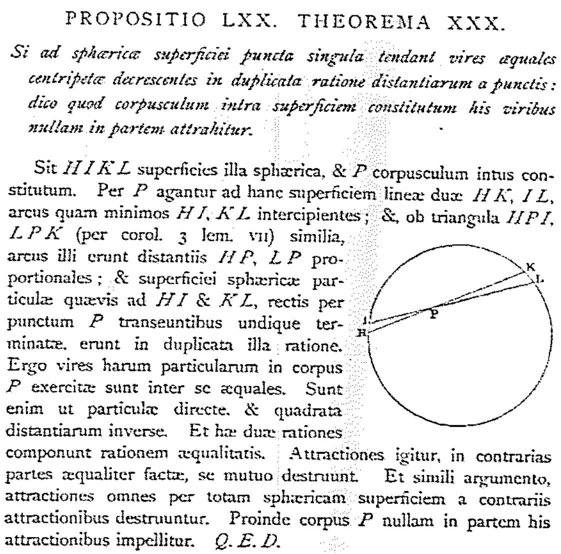


Figura 7. Parte de las demostraciones geométricas que utilizó Kepler para demostrar que las órbitas de los planetas son elípticas.

Newton, Halley y el cometa de Halley

Las demostraciones con base en la geometría pueden ser sumamente elegantes, pero no se prestan a la computación en el sentido moderno, mientras que una representación en la forma de ecuaciones matemáticas sí lo hace. En su *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica,* Newton realiza todas sus demostraciones geométricamente. En la figura 8 mostramos su famosa y sencilla demostración de que en el interior de una cáscara esférica la gravedad se cancela en todos los puntos.

Fueron el propio Newton y su competidor Gottfried Leibniz quienes desarrollaron la herramienta que ahora usamos generalmente para describir las cosas en términos



PROPOSITIO LXX. THEOREMA XXX.

Si ad sphæricæ superficiei puncta singula tendant vires æquales centripetæ decrescentes in duplicata ratione distantiarum a punctis: dico quod corpusculum intra superficiem constitutum his viribus nullam in partem attrahitur.

Sit $HIKL$ superficies illa sphærica, & P corpusculum intus constitutum. Per P agantur ad hanc superficiem lineæ duæ HK, IL, arcus quam minimos HI, KL intercipientes; &, ob triangula HPI, LPK (per corol. 3 lem. VII) similia, arcus illi erunt distantiis HP, LP proportionales; & superficiei sphæricæ particulæ quævis ad HI & KL, rectis per punctum P transeuntibus undique terminatæ, erunt in duplicata illa ratione. Ergo vires harum particularum in corpus P exercitæ sunt inter se æquales. Sunt enim ut particulæ directe, & quadrata distantiarum inverse. Et hæ duæ rationes componunt rationem æqualitatis. Attractiones igitur, in contrarias partes æqualiter factæ, se mutuo destruunt. Et simili argumento, attractiones omnes per totam sphæricam superficiem a contrariis attractionibus destruuntur. Proinde corpus P nullam in partem his attractionibus impellitur. *Q. E. D.*

FIGURA 8. Demostración geométrica debida a Newton de que la gravedad se cancela en el interior de una cáscara esférica. Para el punto P, la atracción gravitacional de la región IH es igual y opuesta a la de la región KL y así para todos los puntos de la cáscara esférica.

matemáticos: el cálculo. La discusión que hubo entre ambos ha sido reseñada en muchos libros, de manera amena por Bardi [2]. Si bien varios científicos anteriores excursionaron en el cálculo, fueron Newton y Leibniz quienes lo popularizaron. En particular, Leibniz lo hizo utilizando una notación más afortunada que la de Newton, que mostramos en la figura 9. Leibniz no solamente estaba preocupado con la teoría de cómo calcular el movimiento y el cambio en el mundo físico, sino tambien en cómo hacer los cálculos en la práctica, ante lo cual construyó una máquina calculadora (figura 10) que antecede a las calculadoras mecánicas de la primera mitad del siglo XX. La máquina nunca llegó a funcionar adecuadamente pero nos indica que Leibniz estaba en el camino correcto: además de la teoría es necesario contar con computadoras.

De hecho, Leibniz es considerado por algunos como el pionero de las ciencias computacionales [1].

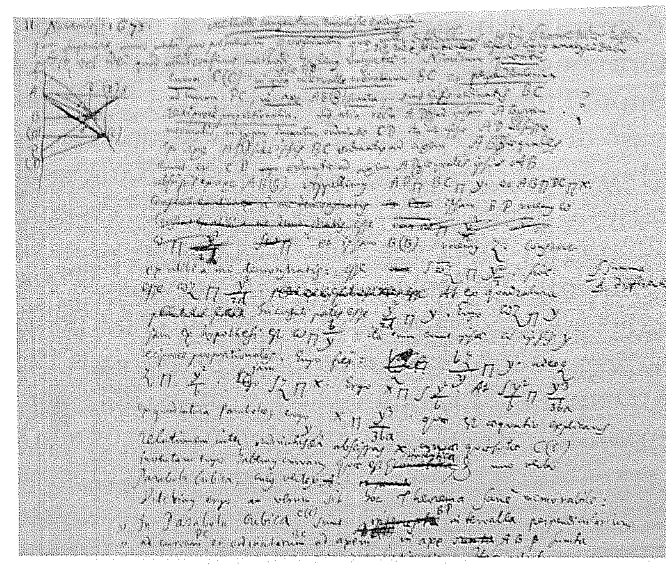


FIGURA 9. Parte de un escrito de Leibniz donde se ven en el margen derecho sus símbolos para la derivada (d) y para la integral (∫).

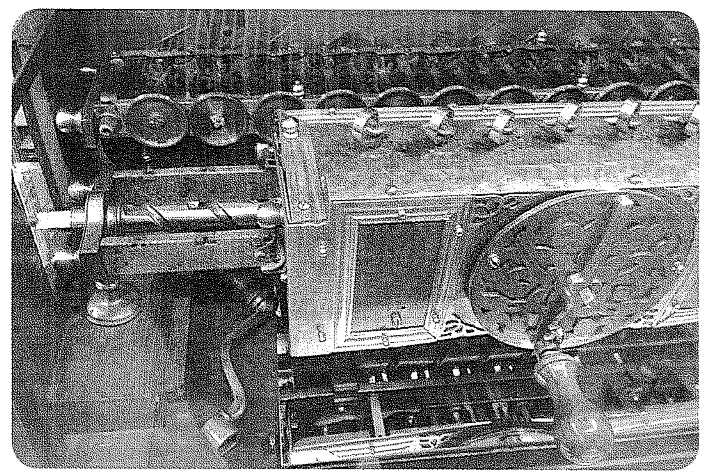


FIGURA 10. La máquina calculadora de Leibniz, la cual se encuentra en el Centro Leibniz en Hannover, Alemania.

El cálculo permitía modelar el cambio de las cosas, en particular las órbitas a futuro de los planetas y demás cuerpos del sistema solar. Uno de los primeros problemas que se trató de modelar matemáticamente fue el regreso del que ahora conocemos como el cometa de Halley. En 1682, el astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742) presenció el paso de un espectacular cometa. Estudiando los registros históricos, encontró que un cometa de similares características había sido observado en 1531 y en 1607 (este último por Johannes Kepler, de quien ya hablamos anteriormente). Halley era amigo y paladín de Newton y entendió que podría tratarse del mismo cuerpo que siguiendo una órbita elíptica que lo llevaría lejos del Sol, regresaría aproximadamente cada 76 años. Pero si el único cuerpo que afectara el movimiento del cometa fuera el Sol, el regreso sería matemáticamente exacto, como un reloj. Sin embargo, los registros históricos indicaban que el paso del cometa por el perihelio (su punto más cercano al Sol) podía atrasarse o adelantarse por unos meses. Lo que ocurría es que la órbita del cometa se veía determinada no solo por el Sol, sino por los grandes planetas del sistema solar, en particular Júpiter y Saturno. Le escribió a Newton: "Cuando termines tus asuntos importantes, quiero pedirte que consideres qué tanto puede perturbarse la órbita de un cometa por la atracción de Saturno y Júpiter, particularmente cuando se acerca al Sol". A esto, Newton contestó: "Esto no puede determinarse sin saber la órbita del cometa y cuándo pasará cerca de Saturno y Júpiter".

El siguiente paso del cometa estaba estimado para 1758. Halley falleció antes y no pudo poner a prueba sus ideas. Pero en Francia, el matemático Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) encabezó un esfuerzo para determinar con la mayor precisión posible la próxima fecha del paso por el perihelio del cometa de Halley. Ayudado por Joseph Lalande y Nicole-Reine Lepaute (una dama de la alta burguesía francesa con gran habilidad para los números), Clairaut logró predecir el paso del cometa con precisión de un mes.

La época de las computadoras humanas

Pronto quedó claro que la producción de efemérides (la posición a futuro de los astros) era posible pero requería de una gran cantidad de computaciones en una época en la que no había máquinas para hacer esto. En la mayoría de los observatorios esta demandante labor la hacían generalmente equipos de mujeres. Quizá la razón principal para esto es que las mujeres ganaban menos que los hombres y con el mismo dinero era posible contratar a un mayor número de *computadoras humanas*. Las mujeres tambien parecían tener más disciplina y concentración que los hombres y este tipo de trabajo era una de las pocas posibilidades con que contaban para realizar una labor intelectual. Cuentan que Edward Charles Pickering (1846-1919), director del Observatorio de Harvard de 1877 hasta su muerte, contaba inicialmente con un asistente hombre que cometía muchos errores. Un buen día, Pickering le dijo que estaba seguro que su ama de casa lo haría mejor, procedió a despedirlo y llevó al Observatorio a Williamina Fleming (figura 11). Esta dama era en efecto su ama de casa, pero ya en el observatorio lo ayudó a contratar y organizar un grupo de señoras, que llegó a ser de más de una docena, para encargarse de hacer los cálculos y las clasificaciones estelares necesarias (figura 12). En el mundillo astronómico de entonces se conocía afectuosamente a estas damas como "el harén de Pickering".

Es hasta mediados del siglo xx que la computación astronómica pasa de manera definitiva de los humanos (o humanas) a las máquinas. Primero se desarrollaron

FIGURA 11. Williamina Fleming (1857-1911). Inicialmente ama de casa de Pickering, fue contratada por este para hacer cálculos en el Observatorio y organizar un equipo de damas que realizara este tipo de trabajo.

FIGURA 12. Parte del equipo de *computadoras humanas* que apoyaban al astrónomo Pickering en Harvard.

computadoras mecánicas que, aunque voluminosas y ruidosas, eran mucho mas rápidas y confiables que el cálculo con papel y lápiz (figura 13).

FIGURA 13. *Computadoras humanas* ayudadas de computadoras mecánicas realizan cálculos para tablas matemáticas.

CONCLUSIÓN

Las necesidades militares de la Segunda Guerra Mundial estimularon el desarrollo de computadoras que cada vez tenían más componentes electrónicos. El trabajo de pioneros como Alan Turing (1912-1954) y John von Neumann (1903-1957) llevó a la primera computadora electrónica de uso general: la ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer, o sea Computadora e Integradora Numérica Electrónica), construida en 1946 (figura 14). Una vez iniciada esta carrera, la computación en la astronomía, y de hecho en todas las ciencias, se fue haciendo más y más poderosa con un crecimiento exponencial que está representado por la famosa ley de Moore [3]. El efecto de esta carrera ascendente en los últimos setenta años de la astronomía requiere de un artículo aparte.

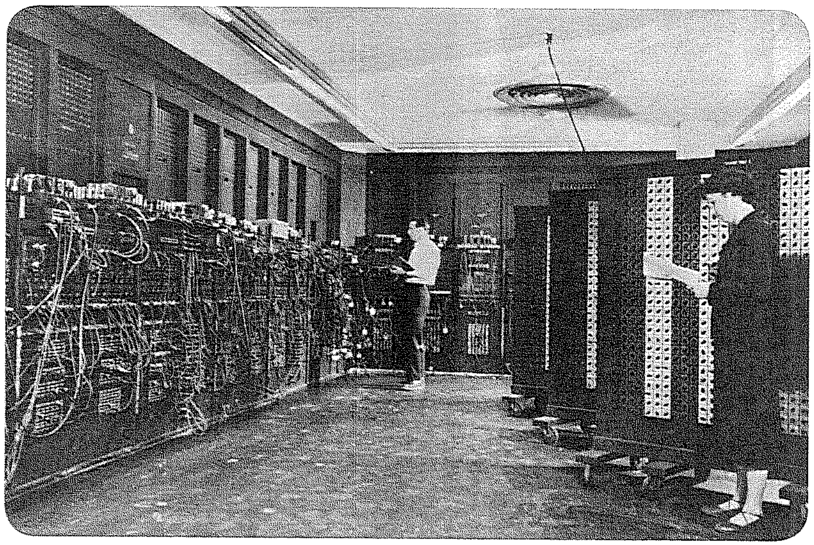


FIGURA 14. La ENIAC, primera computadora electrónica de uso general, fue terminada en 1946.

REFERENCIAS

[1] Davis, M., *The Universal Computer: The Road from Leibniz to Turing*, WW Norton, 2000.

[2] Bardi, J. S., *The Calculus Wars*, Thunder Mouths Press, Estados Unidos, 2007.

[3] Thackray, A., D. C. Brock y R. Jones, *Moore's Law: The Life of Gordon Moore, Silicon Valley's Quiet Revolutionary*, Nueva York, Basic Books, 2015.