

En estos días de diciembre han transcurrido cuatro siglos desde la fecha del nacimiento de Johannes Keppler o Kepler en Weil der Stadt, cerca de Stuttgart, en Württemberg, Alemania.

Luego de recibir las primeras enseñanzas en la vecina Leonberg, pasó Kepler a la Universidad en Tübingen donde aprendió las matemáticas y las teorías de Copérnico. Viajó más tarde, ya en calidad de profesor, a enseñar en la escuela protestante de Graz, la capital de Estiria. La intolerancia católica en las tierras austriacas, y el auge de la corte y el interés por la ciencia del Rey de Bohemia y Emperador Rodolfo II, lo llevaron a Praga, a donde no hacía mucho había llegado el astrónomo danés Tycho Brahe, cuyo trabajo de veintiún años en el observatorio Uranienborg en la isla Hven había llegado a un fin a la muerte del rey protector de las ciencias, Federico II. También Tycho fue llamado por el Emperador a Praga, a donde llegó en 1599, habiendo sido instalado en el castillo de Benatek. Apenas dos años más vivió el astrónomo danés, pero fue tiempo suficiente para orientar al ayudante Kepler en el análisis del cúmulo de observaciones hechas en tierras danesas, y en especial para interesarlo en las referentes al planeta Marte, cuyos complejos movimientos eludían las efemérides construídas con las teorías de Copérnico.

En esta nota recordatoria, quizá valga la pena, ya que es usual decir simplemente, al enunciar las famosas leyes del movimiento de los planetas, que éstas las obtuvo Kepler del estudio de las observaciones de su maestro Tycho Brahe, hacer una breve y muy simplificada relación de cómo llegó a tan importantes conclusiones.

Las observaciones astronómicas de Tycho Brahe, las primeras en las que el error debido a la refracción atmosférica fue corregido, de mucha mayor exactitud que las hasta entonces logradas, suministran las coordenadas celestes de los astros, lo que significa el conocimiento de las direcciones de los mismos en el espacio. Como las órbitas de los planetas no se apartan mucho del plano de la trayectoria de la Tierra, las longitudes celestes bastan para caracterizar las posiciones del Sol y planetas, o para estudiar, en rigor, las proyecciones de los movimientos planetarios sobre la eclíptica, —el plano de la órbita terrestre—.

NOTA: El autor es Decano de la Facultad de Ciencias y Rector encargado de la Universidad Nacional.

La determinación del período de Marte en su movimiento orbital fue la primera tarea. Con base en las observaciones de Tycho Brahe, que permitían determinar los tiempos transcurridos entre sucesivas oposiciones de Marte, es decir, aquellos instantes en que el Sol, la Tierra y Marte se encuentran en línea recta, la Tierra entre los otros dos astros, intervalos que no son rigurosamente iguales. Promediando un buen número de estos intervalos se obtiene el período sinódico de Marte. Expresados en años (el período de revolución de la Tierra), los períodos S , el sinódico conocido, y P sideral por conocer, de Marte, están ligados por relación $1/P = 1 - 1/S$, la cual sería rigurosamente exacta si las velocidades angulares de los dos planetas en sus órbitas heliocéntricas fueran constantes. La observación del tiempo transcurrido entre sucesivos pasos de Marte por el plano de la órbita terrestre, los nodos de la órbita de ese planeta, es también una medida del período buscado.

La siguiente tarea consistió en la determinación de la órbita de la Tierra. Para ello utilizó Kepler el gran número de "observaciones" que Tycho Brahe había acumulado.

El ingenioso raciocinio, del que aquí se presenta su explicación geométrica, dejando de lado los elaborados cálculos, es como sigue:

En el instante t_0 , de una oposición, la Tierra, Marte y el Sol están en línea recta; las direcciones (longitudes) del Sol y de Marte, difieren en 180° , y son conocidas. Kepler, que ya había determinado el período sideral P de Marte, y que suponía que la órbita era una curva cerrada, y recorrida siempre en el mismo lapso de tiempo, P , el período, consideró entonces que en el instante $t_0 + P$ debería ocupar Marte el mismo lugar en el espacio, pero no así la Tierra que se encuentra en punto diferente de su trayectoria, punto que es determinable, ya que conocidas las direcciones de la Tierra al Sol y a Marte y la dirección del Sol a Marte, que era la misma de la Tierra a Marte en la fecha de la oposición, estaban por consiguiente conocidos los tres ángulos del triángulo. Si el proceso se repite para los instantes $t_0 + 2P$, $t_0 + 3P$, . . . , $t_0 + kP$, se ve cómo Kepler pudo determinar muchos puntos de la órbita terrestre, y esto además porque P es un número irracional. Si P fuera un número racional, entonces sólo se hubiera logrado determinar unos pocos puntos de la trayectoria pues en este caso la Tierra va repitiendo las posiciones que ya había ocupado. La forma de la órbita terrestre quedó entonces establecida sin ambigüe-

dades. En este proceso la distancia del Sol a Marte en el instante t_0 hizo las veces de unidad de distancia (Figura número 1).

Una vez trazada la órbita de la Tierra, y tomando el tamaño de tal órbita como referencia, acometió Kepler el estudio de la de Marte, mediante otro raciocinio del cual se dará también su esencia geométrica.

Partiendo de la consideración, otra vez, de que en un instante t_1 y en los instantes $t_1 + P$, $t_1 + 2P$, etc., resultantes de agregar una o más veces el período P de Marte en su órbita, este planeta vuelve a ocupar la misma posición en el espacio. Kepler determina las sucesivas posiciones de la Tierra por el conocimiento de las direcciones (longitudes) del Sol en esas fechas, y la posición, única, de Marte por la intersección de las direcciones a Marte desde las respectivas posiciones de la Tierra. Si P fuera un número entero el procedimiento no tendría validez pues entonces en las aludidas fechas también la Tierra hubiera ocupado la misma posición en el espacio y no hubiera sido posible determinar la posición de Marte por intersección de las direcciones desde puntos diferentes. El proceso que condujo a la determinación de una posición de Marte partiendo del instante t_1 , repetida para otros instantes t_2 , t_3 , etc., condujo a la determinación completa de la órbita de Marte (Figura número 2).

Encontró Kepler para la órbita marciana una forma ovalada y una posición excéntrica para el Sol sobre el diámetro mayor. Analizando los datos y cifras numéricas obtenidas para la órbita de Marte vio cómo el "aplastamiento" $(a-b)/a = 0.00429$ era igual a la mitad del cuadrado de la excentricidad $e = 0.0926$, e interpretó esto como indicación de que la curva era una elipse ya que, para valores pequeños de e , $(a-b)/a = 1 - (1 - e^2)^{1/2} \approx 1/2 e^2$ (Figura número 3). Años más tarde Kepler generalizó lo anterior como una ley que debían cumplir las órbitas de todos los planetas. Suerte tuvo la humanidad, para el desarrollo de su pensamiento científico, que las precisas y numerosas observaciones de Tycho Brahe incluyeran las de un planeta, Marte, con una órbita notoriamente excéntrica, ya que otros, por ejemplo Venus tienen una trayectoria casi circular, y que estas fueran tan exactas como para que la complicada representación geométrica de Copérnico no explicara correctamente las posiciones de Marte, pero no tanto

como para haber confundido a Kepler con la evidencia de un alud de complicaciones y detalles.

Además, al definir las órbitas planetarias como clipses en un plano fijo que pasa por el Sol, que ocupa uno de los focos, fue posible representar correctamente la posición de los planetas en latitud, algo que nunca antes se había logrado pues el modelo de Copérnico, el Sol en el centro de una órbita circular terrestre, no lo permitía.

Habiendo determinado las órbitas de ambos planetas, Tierra y Marte, pudo Kepler estudiar sus movimientos geocéntricamente, y especialmente el análisis de la velocidad orbital de Marte le llevó a establecer que el producto de dicha velocidad por la distancia respectiva al Sol (radio vector) era constante, lo cual, dicho de otro modo, es la conocida ley de las áreas.

Estos magníficos logros sobre la geometría de la órbita de Marte y la velocidad del planeta a lo largo de ella, fueron publicados por Kepler en 1609, en Praga, en su obra *Astronomia Nova*, nueve años después de la muerte de Tycho Brahe y once desde la iniciación del estudio del material del maestro.

Años más tarde halló Kepler una relación entre las distancias de los planetas al Sol, conocidas claro está sólo relativamente a la de la Tierra al Sol, y sus respectivos tiempos de revolución. Esta relación mostró que los cuadrados de los períodos eran proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de las órbitas, o distancias medias al Sol. En la obra *Harmonices Mundi Libri V.*, publicada en Linz, en el año de 1619, apareció enunciada la famosa tercera ley, así como la generalización de las órbitas elípticas a todos los planetas.

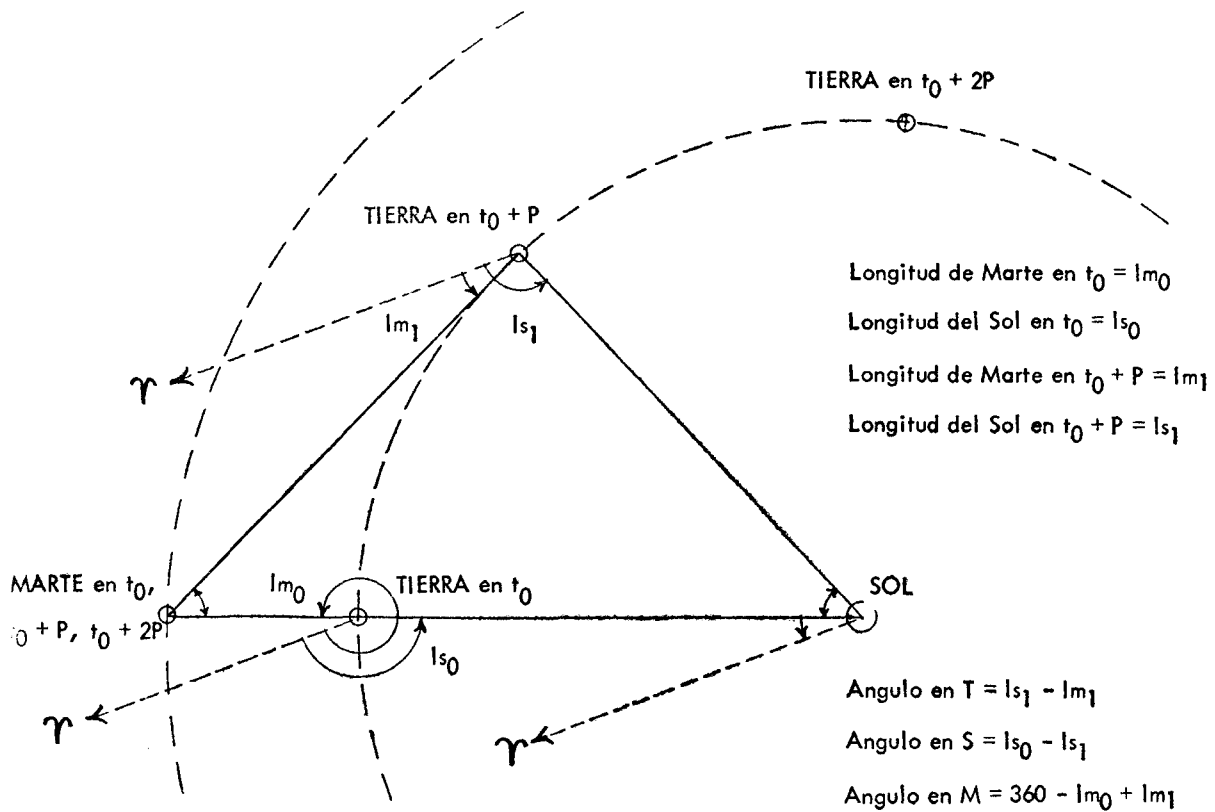
En las teorías anteriores a Kepler cada planeta era tratado como un punto abstracto cuya trayectoria se explicaba por mecanismos geométricos sin ninguna relación entre los varios planetas. En las teorías keplerianas aparece implícita una propiedad física general a la que obedecen todos los planetas y también los satélites de éstos en relación con el planeta, y general para cualquier otro cuerpo, artificial si se quiere, como las sondas interplanetarias de estos días. Este avance con respecto a las ideas de Copérnico fue un paso absolutamente decisivo para la evolución del pensamiento científico.

La ley de las áreas implica la existencia de un campo central de fuerzas, es decir, que la fuerza de atracción está siempre dirigida hacia

el centro, el Sol. La declaración de que la órbita es una elipse plana, uno de cuyos focos está ocupado por el centro de atracción, implica que la atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La verificación de la tercera ley en el caso del movimiento de los satélites de Júpiter alrededor del planeta indica que éste también es capaz de actuar como centro de atracción; la atracción es entonces una propiedad inherente a la materia y así como el Sol atrae el planeta, éste atrae a sus satélites y también al Sol, con todo lo cual está ya muy cerca la Ley de la Gravitación Universal, enunciada por Newton medio siglo más tarde.

Antes de verlas con sus propios ojos a través de un antejo, dudó Kepler de la existencia de las lunas de Júpiter, pues "... por qué las habría, no existiendo en ese planeta nadie que admire tan maravilloso espectáculo". ¿Qué habría dicho de haber sabido que sus magníficos logros abrirían el camino para que, apenas tres siglos y medio después, pusiera el hombre sus plantas en la Luna?

Bogotá, diciembre, 1971.



Longitud de Marte en $t_0 = l_{m0}$
 Longitud del Sol en $t_0 = l_{s0}$
 Longitud de Marte en $t_0 + P = l_{m1}$
 Longitud del Sol en $t_0 + P = l_{s1}$

Angulo en T = $l_{s1} - l_{m1}$
 Angulo en S = $l_{s0} - l_{s1}$
 Angulo en M = $360 - l_{m0} + l_{m1}$

FIGURA 1

Longitud de Marte en $t_1 = l_m$

Longitud de Marte en $t_1 + P = l_{m1}$

Longitud de Marte en $t_1 + 2P = l_{m2}$

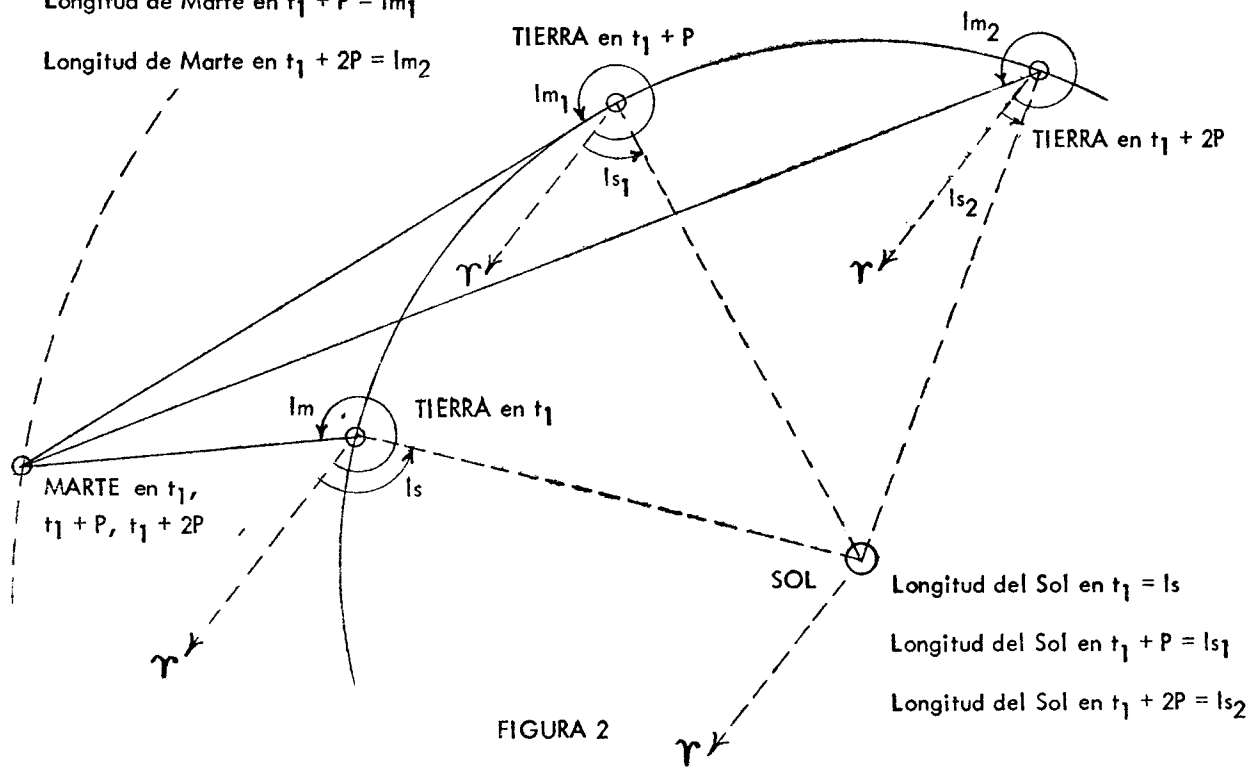


FIGURA 2

Longitud del Sol en $t_1 = l_s$

Longitud del Sol en $t_1 + P = l_{s1}$

Longitud del Sol en $t_1 + 2P = l_{s2}$

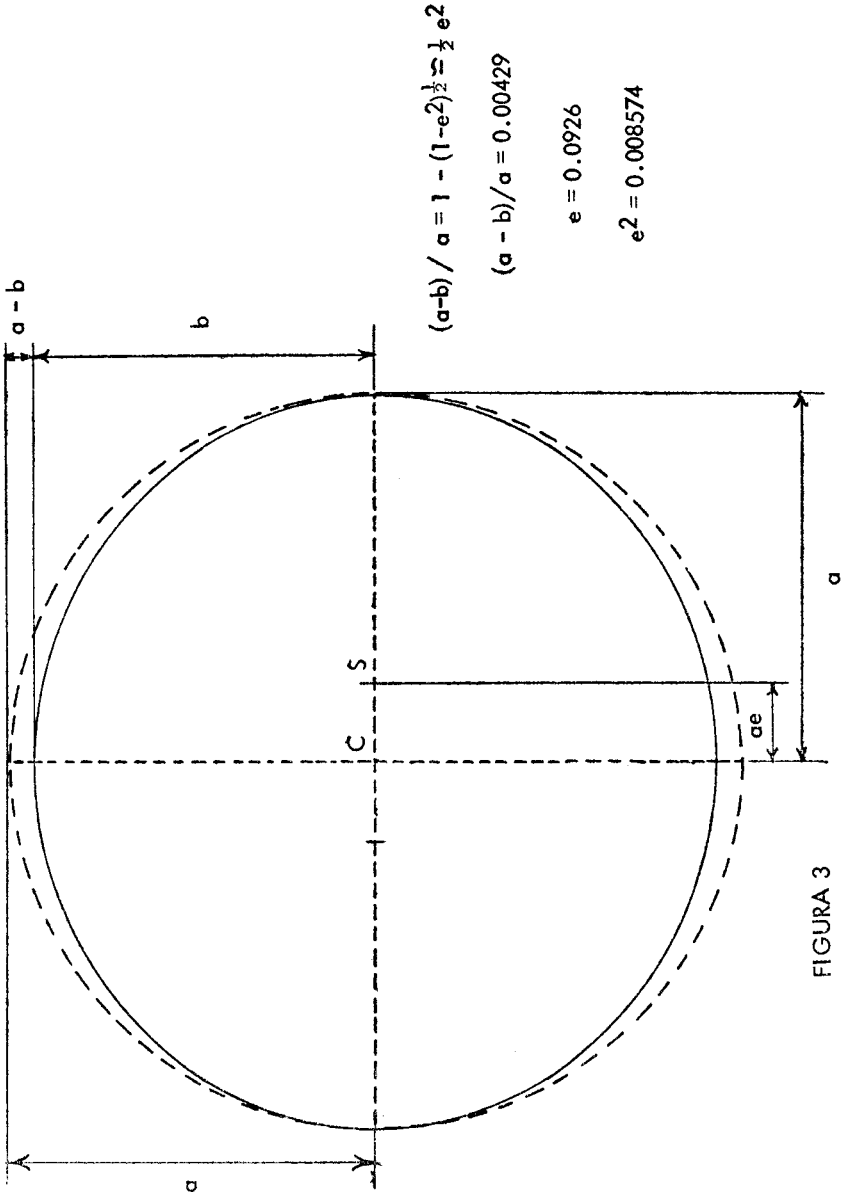


FIGURA 3