CALCULO DE LA DISTANCIA MINIMA ENTRE UN OBJETO CELESTE Y LA TIERRA

POR

IVAN MACHIN

CONTENIDO

CONTENIDO

CONTENIDO

1. SISTEMAS PARA MEDIR EL TIEMPO

1-1 Concepto de tiempo:

Es el intervalo que hay entre dos eventos asociados a un fenómeno regular. Por ejemplo, tiempo es el intervalo entre dos gotas de agua que caen de un grifo semiabierto, el intervalo entre dos oscilaciones completas de un péndulo.

1-2 Las unidades usadas para medir el tiempo.

1 Segundo	=	1 Segundo
1 Minuto	=	60 Segundos
1 Hora	=	60 Minutos
1 Día	=	24 Horas
1 Año Civil	=	365 Días
1 Año Sidéreo	=	365.25 Días

1-3 Concepto de año.

La Tierra gira alrededor del Sol describiendo una elipse. El tiempo que tarda la Tierra en completar un ciclo en su órbita se denomina el período de la Tierra. El período de la Tierra define una escala de tiempo denominada **"año sidéreo"** y equivale a 365.25 días. Por razones prácticas se define el **"año civil"**, y equivale a 365 días exactamente. Sin embargo, para tomar en cuenta la fracción 0.25 de días, se creó el **"año bisiesto"** de 366 días.

Los años bisiestos se asignan cada cuatro años civiles, y se reconocen porque son divisibles entre 4. Por ejemplo, 1904 es bisiesto por ser divisible entre cuatro, 1960 es bisiesto por ser divisible entre 4.

Los años divisibles entre 4 son bisiestos, a exclusión de los terminados en dos ceros. Sin embargo, serán bisiestos, aunque terminen en dos ceros, aquellos años cuyas cifras significativas sean divisibles entre 4; por ejemplo, el año 2000, termina en dos ceros pero, su cifra significativa (20) es divisible entre 4, por lo tanto, el año 2000 se toma como bisiesto.

1-4 Determinación del número de días entre dos fechas.

A continuación se da el procedimiento para determinar el número de días entre dos fechas, este cálculo es de suma importancia en Astronomía de Posición, y es el punto de partida para el cálculo de la posición de un objeto en la bóveda celeste. Es conveniente antes de proseguir, establecer las reglas básicas de nuestro calendario Gregoriano:

a) No existe el año cero como punto de partida en el contaje del tiempo en el sistema Gregoriano.

b) Los días en el sistema Gregoriano son **días transcurridos**.

Como consecuencia de estas reglas, la fecha Gregoriana 12/Octubre/1993, por ejemplo, indica que ya han transcurrido los meses de Enero a Septiembre, más, 12 días completos del mes de Octubre del año 1993. Otra consecuencia de las reglas (a) y (b) es que el año 2000, por ejemplo, continúa siendo parte del siglo XX, o, que la década de los 90 no comienza en el año 1990 sino con el año 1991. La fecha 31/Enero/1993 indica que han transcurrido 31 días completos del mes de Diciembre, por lo tanto, el año nuevo se celebra cuando han transcurrido 24 horas del que va a ser el primer día de 1994, ya que en el sistema Gregoriano, 1/Enero, significa que ha transcurrido un día completo del año en cuestión.

Problema (1):

Determine el número de días entre el 3/Marzo/1901 y el 20/Julio/1994.

****** Año 1901 ******

a) Días que restan de Marzo: 31 - 3 = **28**

b) Días que restan de 1901: **28** + 30(Abril) + 31(Mayo) + 30(Junio) + 31(Julio) +
31(Agosto) + 30(Septiembre) + 31(Octubre) +
30(Noviembre) + 31(Diciembre) = **275**

****** Año 1994 ******

c) Días transcurridos de Julio: **20**

d) Días transcurridos de 1994: **20** + 31(Enero) + 28(Febrero, No Bisiesto) = **79**

e) Años entre ambas fechas: (1993 - 1902) + 1 = **92**

f) Cantidad de días asociados a los años en (e): **92** x 365 = **33580**

g) Cantidad de años bisiestos entre ambas fechas: **22**

h) Cantidad de días asociados a los años bisiestos: **22**

i) Total de días entre las fechas: (b) + (d) + (f) + (h) = **33956**

Problema (2):

Determine el número de años bisiestos entre 1492 y 1993 (incluyendo ambos años). Para este cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$N = \frac{an - a1}{4} \tag{1}$$

Donde:

a1 = Primer año bisiesto a partir del año más viejo (1492).

an = Año bisiesto más reciente (1992).

$$N = \frac{1992 - 1492}{4} = 125$$

Por lo tanto, hay 125 años bisiestos entre 1492 y 1993.

1.5. Conversión de fecha Gregoriana a fecha Juliana.

La fecha Juliana es una forma de contar el tiempo y que no hay que confundir con el calendario Juliano. Este sistema de contar el tiempo tiene la ventaja que permite de una manera sencilla saber el número de días entre dos fechas distantes. La fecha Juliana se comienza a contar en forma correlativa a partir del primero de enero del año 4713 antes de nuestra Era, esto define el día **uno**. Ha de tenerse en cuenta que el día Juliano comienza a las 12^H, es decir, al medio día. Por ejemplo, a las 12^H del 1/Enero/1982 la fecha Juliana es 2.444.971,0 días[1]. A continuación se resumen los procedimientos que permiten trasformar la fecha Gregoriana en fecha Juliana.

a) Establecer la fecha Gregoriana de interés (t): Día/Mes/Año

b) Se define una fecha base (t_B) que es el número de días Julianos asociados a la fecha Gregoriana 0.5/Enero/1900[2]:

$$t_B = 2415020.0 \tag{2}$$

c) Días que restan del año 1900: 365.5 Días

d) Cálculo del número de días que han transcurrido del año asociado a la fecha de interés: DT

e) Años transcurridos entre las dos fechas: (ver problema 1)

$$A = [\,(\text{Año} - 1) - 1901] + 1 = (\,\text{Año} - 1901\,)$$

f) Cantidad de días asociados a los años calculados en (e):

$$DA = (\text{Año} - 1901)\ 365$$

---

[1]Tomado del "Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para 1982", Dirección General del Instituto Geográfico Nacional".

[2] El año 1900 es bisiesto, por eso restan 365.5 días y no 364.5

g) Cantidad de días asociados a los años bisiestos entre las dos fechas t y t_B:

$$DAB = \frac{(A1 - 1904)}{4}$$

Donde: A1 = Ultimo año bisiesto respecto al año de interés.

Es bueno hacer notar que A1 puede ser igual al año de la fecha de interés cuando el mismo es bisiesto.

h) Cantidad de días entre las fechas t y t_B: (c) + (d) + (f) + (g)

i) Fecha Juliana asociada a la fecha de interés:

$$T = t_B + (c) + (d) + (f) + (g)$$

Problema (3):

Calcular la fecha Juliana del 1/Enero/1982 a las 12^H

Tabla 1

Concepto	Cantidad
c) Días que restan del año 1900	365.5 Días
d) Cálculo del número de días que han transcurrido del año asociado a la fecha de interés	1.5 Días
e) Años transcurridos entre las dos fechas: (ver problema 1) (1982 - 1901)	81 Años
f) Cantidad de días asociados a los años calculados en (e) (81) 365	29565 Días
g) Cantidad de días asociados a los años bisiestos entre las dos fechas t y t_B: $\frac{(1980 - 1904)}{4}$	19 Días
h) Cantidad de días entre las fechas t y t_B: (c) + (d) + (f) + (g)	299451 Días
j) Fecha Juliana asociada al 1/Enero/1982 a las 12^H $T = t_B + (c) + (d) + (f) + (g)$	2444971 Días Julianos

1.6. Conversión de fecha Juliana a fecha Gregoriana.

A continuación se da el procedimiento para convertir una dada fecha Juliana T en fecha Gregoriana.

a) Se parte del día t =0.5/Enero/1900 que tiene asociada la fecha Juliana t_B= 2415020.0

b) Cálculo del número de días entre la fecha T y la fecha t_B:

$$DT = (T - t_B) + 1$$

Osérvese que a la diferencia se le adiciona 1. Esto se debe a que no existe en la fecha Juliana día cero.

c) Se hace la pregunta: ¿Es DT $\geq$ 366?, si la respuesta es afirmativa, se procede a cambiar la fecha Gregoriana de partida t por la siguiente:

$$t1 = 0.5/\text{Enero}/1901$$

Además, se resta a DT, 366 días:

$$DT1 = DT - 366$$

Obsérvese que este valor de 366 viene del hecho de que 1900, es bisiesto.

d) Nuevamente, se hace la misma pregunta, pero ahora, con DT1: ¿Es DT1 $\geq$ 365?, y si la respuesta sigue siendo negativa, se hace lo siguiente:

$$t2 = 0.5/\text{Enero}/1902$$

$$DT2 = DT1 - 365$$

Obsérvese que se resta a DT1 el de valor de 365, debido a que 1901, es año normal de 365 días.

e) Este proceso se continúa hasta que en el paso "i" la respuesta es negativa. Para este paso se tiene:

$$t_i = 0.5/\text{Enero}/(1900 + i) \quad \text{para} \;\; i = 1, 2, \ldots$$

$$DT_i = DT_{i-1} - r_{i-1}$$

Donde r_{i-1} es igual a 366 si y sólo si, el índice "i-1" es múltiplo de cuatro, de lo contrario, r_{i-1} es igual a 365. Para el caso en donde DT_i sea menor que r_{i-1}, se procede a determinar los meses y días transcurridos del año (1900 + i + 1). Realizado este cálculo se tiene la fecha Gregoriana de la fecha Juliana T.

Problema (4):

Determine la fecha Gregoriana de la fecha Juliana T= 2416937.0

Tabla 2

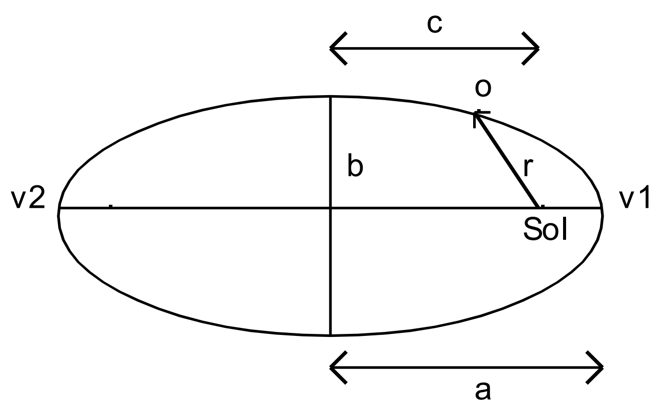
Concepto	**Cantidad**
Fecha Gregoriana de partida	t = 0.5/Enero/1900
Fecha Juliana asociada a la fecha Gregoriana de interés	T = 2416937.0
Cálculo del número de días entre la fecha T y la fecha t_B $DT = (T - t_B) +1$	1918
DT > 366	-
Cálculo de t1	t1 = 0.5/Enero/1901
Cálculo de DT1: DT1 = DT - 366	DT1 = 1552
DT1 > 365	-
Cálculo de t2	t2 = 0.5/Enero/1902
Cálculo de DT2: DT2 = DT1 - 365	DT2 = 1187
DT2 > 365	-
Cálculo de t3	t3 = 0.5/Enero/1903
Cálculo de DT3: DT3 = DT2 - 365	DT3 = 822
DT3 > 365	-
Cálculo de t4	t4 = 0.5/Enero/1904
Cálculo de DT4: DT4 = DT3 - 365	DT4 = 457

Tabla 2: Continuación

Concepto	**Cantidad**
DT4 > 366	-
Cálculo de t5	t5 = 0.5/Enero/1905
Cálculo de DT5: DT5 = DT4 - 366	DT5 = 91
DT5 < 365	
DT5 > 31 (Enero)	
Cálculo de t5(1)	t5(1) = 0.5/Febrero/1905
DT5(1) = DT5 - 31	DT5(1) = 60
DT5(1) > 28 (Febrero)	-
Cálculo de t5(2)	t5(2) = 0.5/Marzo/1905
DT5(2) = DT5(1) - 28	DT5(2) = 32
DT5(2) > 31 (Marzo)	-
Cálculo de t5(3)	t5(3) = 0.5/Abril/1905
DT5(3) = DT5(2) - 31	DT5(3) = 1
DT5(3) < 30 (Abril)	-
Cálculo de t5(4)	t5(4) = 1.5/Abril/1905
Fecha Gregoriana de la fecha Juliana pedida en el problema (T = 2416937.0)	1.5/Abril/1905

2. ELEMENTOS DE ORBITA DE UN OBJETO CELESTE

El Astrónomo Kepler estableció que la órbita de un objeto alrededor del Sol es una elipse. El Sol se encuentra en el foco de la elipse.



A continuación se definen los elementos que caracterizan la órbita de un objeto celeste:

a) Semieje mayor (a): Distancia desde el centro de la elipse hasta el vértice v1 o el v2.

b) Distancia perihélica (q): Segmento entre el Sol y el vértice v1.

c) Excentricidad (e): Es el cociente del segmento c entre el semieje mayor.

$$e = \frac{c}{a}$$

El valor de e para una elipse es menor que uno siempre; para una circunferencia el valor de e es igual a cero.

d) Radio vector (r): Es el segmento entre el Sol y el objeto "o".

e) Período (P): Es el tiempo que tarda el objeto en completar su órbita. El valor del período en días se puede calcular mediante:

$$P = \frac{2\pi a^{3/2}}{k} \tag{1}$$

Donde: $k = 0.0172029895$

f) Anomalía verdadera (υ): Es el ángulo entre el radio vector y el segmento que define el perihelio.

g) Movimiento diario (n): Es la cantidad de grados por día que abarca el objeto sobre su órbita, suponiendo que la misma sea circunferencial.

h) Epoca del paso por el perihelio (τ): Es la fecha cuando el objeto está en su perihelio.

3. ELEMENTOS DE ORBITA DE UN OBJETO CELESTE EN EL ESPACIO. (Ver Fig. 1)

Los elementos de órbita definidos en la sección 2 están contenidos sobre el plano de la órbita del objeto, es decir, sobre su órbita en torno al Sol. Esto no es suficiente para determinar la posición de un objeto respecto a la Tierra. Es necesario especificar la orientación en el espacio de la órbita del objeto con respecto a la órbita de la Tierra. Debido a que todas las órbitas de los objetos del Sistema Solar tienen al Sol situado en sus respectivos focos, necesariamente las órbitas de dichos objetos cortan la órbita de la Tierra. El corte del plano de la órbita del objeto con el plano de la órbita de la Tierra genera la **Línea de los Nodos** (en la Fig. 1 es el segmento entre NA y ND). Esta Línea define al **Nodo Ascendente** (Fig. 1 identificado como **NA**) y al **Nodo Descendente** (en Fig. 1 se identifica como **ND**). A continuación se definen los elementos de órbita en el espacio que completan la definición de la órbita del objeto.

a) Longitud del Nodo Ascendente (Ω): Angulo entre el segmento que contiene al Sol y al Punto Vernal[3] y el segmento que contiene al Sol y al Nodo Ascendente.

b) Argumento del Perihelio (ω): Angulo entre el Nodo Ascendente y el Perihelio.

[3] El punto Vernal es una referencia fundamental usada en astronomía.

c) Inclinación de la órbita (i): Angulo entre el segmento que contiene el perihelio del objeto y el plano de la órbita de la Tierra.

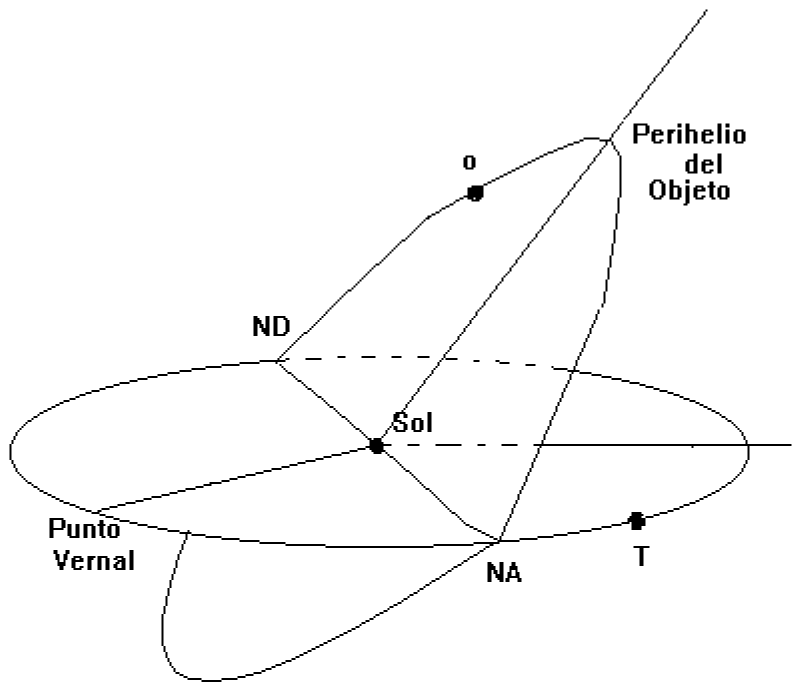


Fig. 1. Elementos de órbita del objeto en el espacio. Estos elementos dan la orientación de la órbita del objeto con respecto a la órbita de la Tierra.

4. DEFINICION DEL SISTEMA DE COORDENDAS RECTANGULARES ECLIPTICAS HELIOCENTRICAS

Este sistema está definido por tres ejes de referencia y cuyo origen está sobre el Sol. El eje x está definido por la semirecta que comienza en el Sol y contiene al punto Vernal. El eje y se encuentra a 90° respecto al eje x en dirección del movimiento de rotación de la Tierra en su órbita. Es decir, que los ejes x e y, o, mejor, el plano xy es coplanar con el plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. El eje z se obtiene como el producto vectorial del eje x por el eje y en sentido dextrógiro.

5. CALCULO DE LAS COORDENADAS RECTANGULARES ECLIPTICAS HELIOCENTRICAS DEL OBJETO.

A continuación se dan los pasos para el cálculo de las coordenadas ecuatoriales de un objeto celeste.

a) Establecer para qué fecha se desea saber la posición del objeto. Esta fecha se simbolizará como t en lo que sigue el estudio.

b) Para la fecha t buscar las coordenadas rectangulares ecuatoriales geocéntricas del Sol (se simbolizan como X, Y, Z). Estos parámetros se consiguen en "The American Ephemeris and Nautical Almanac" (publicado anualmente por U. S. Goberment Printing Office, Washington D. C. 20402). En el caso de no de dichas coordenadas es posible obtener los valores aproximados de las X, Y, Z del Sol. En la sesión 6 se dan los procedimientos para el cálculo de estos parámetros que son claves en la Astronomía de posición.

c) Establecer el número de días entre la fecha t y la época del paso por el perihelio τ:

$$(t - \tau)$$

d) Calcular la anomalía media del objeto (M):

$$M = n\,(t - \tau)$$

e) Calcular la anomalía excéntrica (E) por medio de la ecuación de Kepler:

$$M = E - \left(\frac{180\ e}{\pi}\right) \text{sen } E$$

Esta es una ecuación trascendente y debe ser resuelta por métodos iterativos, el esquema de resolución es como sigue:

$$Eo = M$$

Iteración #1

$$Mo = Eo - \left(\frac{180\ e}{\pi}\right) \text{sen } Eo$$

$$\Delta Eo = \frac{M - Mo}{(1 - e \cos Eo)}$$

$$E1 = Eo + \Delta Eo$$

$$¿\text{ Es } |\Delta Eo| \leq 10^{-5}\ ?$$

Si la respuesta es si, entonces, E1 es la anomalía excéntrica buscada, pero, si la respuesta es no, entonces, se repiten los cálculos:

Iteración #2

$$M1 = E1 - \left(\frac{180\ e}{\pi}\right) \text{sen } E1$$

$$\Delta E1 = \frac{M - M1}{(1 - e \cos E1)}$$

$$E2 = E1 + \Delta E1$$

$$¿\text{ Es } |\Delta E1| \leq 10^{-5}\ ?$$

Se continúa el proceso hasta que en la iteración # n el parámetro $|\Delta E_n|$ es igual o menor a 10^{-5}, en cuyo caso, se para el proceso y el $\mathbf{E_n}$ obtenido en la n iteración, es igual a la anomalía excéntrica: $E = E_n$

g) Cálculo de la Anomalía verdadera (ν):

$$\text{Tang}\left(\frac{\nu}{2}\right) = \sqrt{(1+e)/(1-e)}\ \text{Tang}\left(\frac{E}{2}\right)$$

Se obtiene despejando a ν de la ecuación. Para obtener a ν en el cuadrante correcto se procede a evaluar el seno y coseno de dicho ángulo: S = sen (ν), C = cos (ν). La Tabla siguiente da el cuadrante correcto de ν:

Tabla 1.

Valor del seno	Valor del coseno	Rango de ν
$S > 0$	$C > 0$	$0 < \nu < 90$
$S > 0$	$C < 0$	$90 < \nu < 180$
$S < 0$	$C < 0$	$180 < \nu < 270$
$S < 0$	$C > 0$	$270 < \nu < 360$

Una vez determinado el cuadrante de ν, se procede a sumar o restar a dicho ángulo el valor de 90° hasta que el valor del mismo, esté dentro del rango dado por la Tabla.

f) Cálculo del radio vector Sol-Objeto (r):

$$r = \frac{Ao}{1 + eo\cos(\nu)}$$

h) Cálculo de las coordenadas eclípticas rectangulares heliocéntricas del objeto:

$$u = (\omega + \nu)$$

$$x' = r\,[\,\cos(u)\cos(\Omega) - \operatorname{sen}(u)\operatorname{sen}(\Omega)\cos(i)\,]$$

$$y' = r\,[\,\cos(u)\operatorname{sen}(\Omega) - \operatorname{sen}(u)\cos(\Omega)\cos(i)\,]$$

$$z' = r\,[\,\operatorname{sen}(u)\operatorname{sen}(i)\,]$$

i) Cálculo de las coordenadas ecuatoriales rectangulares heliocéntricas del objeto[4]:

$$x = x'$$

$$y = y' \cos(\varepsilon) - z' \operatorname{sen}(\varepsilon)$$

$$z = y' \operatorname{sen}(\varepsilon) + z' \cos(\varepsilon)$$

Donde: ε = Oblicuidad de la Eclíptica, cuyo valor aproximado es 23°,45.

j) Coordenadas rectangulares geocéntricas ecuatoriales:

$$\xi = x + X$$

$$\eta = y + Y$$

$$\zeta = z + Z$$

k) Cálculo de la distancia Objeto-Tierra (Δ):

$$\Delta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$$

[4] Nota del Autor: Existe una diferencia de signos entre las ecuaciones planteadas por el texto usado como referencia (McCuskey) y las dadas en este trabajo, debido a que hay un error en las ecuaciones para x e y en el texto de referencia.

6. CALCULO DE LAS COORDENADAS RECTANGULARES ECLIPTICAS HELIOCENTRICAS DE LA TIERRA

A continuación se resumen las ecuaciones que permiten el cálculo de las coordenadas geocéntricas del Sol.

a) Cálculo del número de días entre la fecha de interés (t) y la fecha base 0.5/Enero/1900(t_B): $(t - t_B)$

b) Cálculo de las centurias Julianas a partir de la fecha base:

$$CJ = \frac{(t - t_B)}{36525}$$

c) Cálculo de los elementos de órbita del sistema Sol-Tierra[5]:

c1) Excentricidad de la órbita:

$$e_{ST} = 0.01675104 - 4.18x10^{-5}\ CJ$$

c2) Cálculo de la longitud del perihelio para el Equinoccio de 1950.0:

$$\varpi_{ST} = 281.220844 + 1.71917\ CJ$$

c3) Cálculo de la anomalía media:

$$M_{ST} = 358.47583 + 35999.04975\ CJ$$

c4) Oblicuidad de la eclíptica:

$$\varepsilon = 23.452294 - 0.0130125\ CJ$$

c5) Semieje mayor de la órbita Sol-Tierra:

$$a_{ST} = 1.0000\ U.A.$$

---

[5] Estos elementos de órbita fueron tomados del "Explanatory Suplement to The Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac", Her Majesty's Stationery Office, Fourth Impression, 1977.

Con el valor de la anomalía media M_{ST} se calcula la anomalía excéntrica (E_{ST}), el radio vector Sol-Tierra (R_{ST}) y la Anomalía verdadera (ν_{ST}) del sistema Sol-Tierra usando los mismos procedimientos dados en la sesión 5, procedimientos e, f y g.

d) Cálculo de la longitud del Sol para la fecha t (equinoccio y eclíptica actual):

$$\lambda_S = \varpi_{ST} + \nu_{ST}$$

Donde: ν_{ST} = Anomalía verdadera del Sol

e) Transformación de la longitud del Sol del equinoccio del día (λ_S) para el equinoccio de 1950.0 ($\lambda_S(1950.0)$)[6]:

e1) Precesión anual en longitud:

$$Pr = 50''.2564 + 0''.0222\ CJ$$

e2) Velocidad anual de rotación de la eclíptica:

$$\pi = 0''.4711 - 0''.0007\ CJ$$

e3) Longitud del eje de rotación de la eclíptica:

$$\Pi = 173°\ 57'.06 + 54'.77\ CJ$$

e4) Precesión en longitud para la fecha t:

$$a = Pr\ (t - t_0)/365.25$$

Donde: t_0 = Fecha asociada a 1950.0 (0/Enero/1950 que equivale a 2433281.5 días Julianos)

e5) Inclinación de la eclíptica para la fecha t respecto a la época t_0:

$$b = \pi\ (t - t_0)/365.25$$

[6] Estos elementos de órbita fueron tomados del "Explanatory Suplement to The Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac", Her Majesty's Stationery Office, Fourth Impression, 1977.

e6) Longitud del punto vernal para la fecha t respecto a la época t_0:

$$c = 180 - \Pi + 0.5\ a$$

e7) Longitud del Sol para el equinoccio de 1950.0:

$$\beta = b\ \mathrm{sen}(\lambda_S + c)$$

$$\lambda_S(1950.0) = \lambda_S + a - b\cos(\lambda_S + c)\ \mathrm{Tang}(\beta)$$

e7) Cálculo de las coordenadas ecuatoriales geocéntricas del Sol para el Equinoccio y Eclíptica de 1950.0:

$$X = R_{ST}\cos(\lambda_S)$$

$$Y = R_{ST}\ \mathrm{sen}(\lambda_S)\cos(\varepsilon) - 19.29\ \beta''\ x10^{-7}$$

$$Z = R_{ST}\ \mathrm{sen}(\lambda_S)\ \mathrm{sen}(\varepsilon) + 44.48\ \beta''\ x10^{-7}$$

Donde: $\beta'' = \beta$ en segundos de arco.

7. DEFINICION DE LAS DISTINTAS DISTANCIAS MINIMAS ENTRE UN OBJETO CELESTE Y LA TIERRA

Un parámetro que normalmente se da junto con las coordenadas de los objetos celestes, es la distancia objeto-Tierra. Este parámetro se simboliza con la letra griega delta mayúscula (Δ), y se expresa en unidades astronómicas. La distancia objeto-Tierra varía en función del tiempo y con cada venida periódica del objeto a su encuentro con su respectivo perihelio, siempre se observa que dicha distancia llega a un mínimo en un momento dado, para luego aumentar. También se observa que cuando el objeto en el siguiente ciclo periódico de su órbita, vuelve a pasar por su perihelio, se produce nuevamente el mínimo de la distancia objeto-Tierra. Sin embargo, este nuevo mínimo tiene un valor distinto respecto al anterior ciclo.

La razón de estos mínimos cambiantes se puede encontrar en función de las características geométricas de la órbita del objeto respecto de la órbita de la Tierra; y de efectos perturbacionales de los planetas mayores del sistema solar: Júpiter y Saturno. Los efectos perturbacionales afectan profundamente la geometría de la órbita de los objetos pequeños: asteroides y cometas; como consecuencia de estos cambios geométricos se producen variaciones en los valores de las distancias mínimas. Una manera de poner en evidencia estos efectos gravitacionales es calcular la distancia objeto-Tierra para un dado conjunto de elementos de órbita, y para distintas fechas. Estos valores se comparan luego con las distancias objeto-Tierra dadas por efemérides recientes del objeto donde, fácilmente, se puede observar diferencias considerables entre lo calculado contra lo observado.

En el presente estudio no se tomarán en cuenta las perturbaciones gravitacionales y sólo se harán consideraciones geométricas para el cálculo de la distancia objeto-Tierra. En esta sección se definirán tres tipos de distancias mínimas atendiendo a las circunstancias geométricas en cada caso.

7.1. Distancia mínima nodal.

En la Fig. 2 se representa la órbita del objeto "O" respecto a la órbita de la Tierra "T". Existen dos distancias nodales definidas por los segmentos ab y a'b' en dicha Figura. Obsérvese que ambas distancias se definen sobre la línea de los nodos; esta es la razón por la cual, esta distancia, se la denomina mínima nodal.

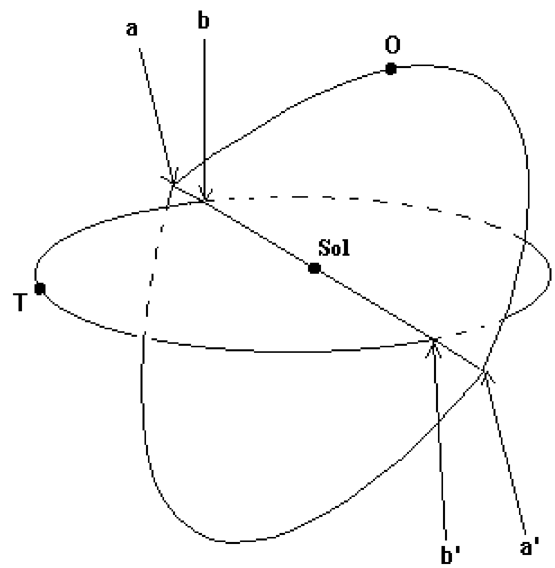


Fig. 2. Existen dos distancias nodales definidas por los segmentos ab y a'b'. La Tierra se representa por "T" y el objeto por "O".

7.2. Distancia mínima absoluta.

En la Fig. 3 se ilustra el concepto de distancia mínima absoluta y su relación con la distancia nodal. El segmento ac define la distancia mínima absoluta entre la órbita del objeto y la órbita de la Tierra. Obsérvese que la distancia nodal está definida por el segmento bc y, por lo tanto, la distancia mínima absoluta es menor que la nodal. La distancia mínima absoluta es la menor distancia que puede existir entre un objeto celeste y la Tierra.

La distancia mínima absoluta se localiza siempre en las inmediaciones de los nodos (el nodo ascendente o el nodo descendente). Esta zona de los nodos y, en especial, el segmento que define el mínimo absoluto, es donde existe la posibilidad de choque de la Tierra con un objeto celeste.

7.3. Distancia mínima relativa y su relación con las distancias mínimas nodal y absoluta.

En la Fig. 4 se ilustra el concepto de sincronización del movimiento del objeto con respecto a la Tierra. En un momento dado el objeto celeste "O" esta localizado exactamente sobre su mínimo absoluto respecto a la órbita de la Tierra (el punto M define la distancia mínima absoluta de la Tierra). En ese momento la Tierra se encuentra en un punto cualquiera "T" de su órbita. Si el período del objeto es igual al de la Tierra, entonces, dentro de un período del objeto, este se encontrará nuevamente en la posición "O" de la Figura, y la Tierra se encontrará nuevamente en la posición "T". Esta situación continúa así, ciclo tras ciclo del objeto en su órbita. En adelante, cuando se hable de "ciclo", se deberá entender como el espacio entre dos pasos sucesivos por un punto de la órbita del objeto celeste definido como el mínimo absoluto del objeto respecto a la Tierra.

Si se supone ahora que el período del objeto es mayor que la Tierra, por ejemplo, 1.1 de año y cuya diferencia es $\Delta P = 0.1$ (diferencia del período del objeto menos el período de la Tierra), entonces, sucede que dentro de un período de la Tierra (un año), el objeto estará en el punto O' y la Tierra estará en la posición T. Por lo tanto, se necesita una cantidad de tiempo adicional ΔP para que el objeto logre llegar a su mínimo. Cuando por fin el objeto llega a su mínimo, la Tierra avanzó sobre su órbita un tramo equivalente a la unidad de tiempo ΔP. En la Figura 4 la Tierra se traslada de la posición T a la posición T' para el momento en que el objeto, se encuentra en su mínimo absoluto. Obsérvese que al estar el objeto es su mínimo absoluto, define un ciclo y la distancia objeto-Tierra (segmento T'O en Fig. 4) para esta circunstancia, define la menor distancia entre ambos cuerpos para esta particular venida del objeto O a su perihelio.

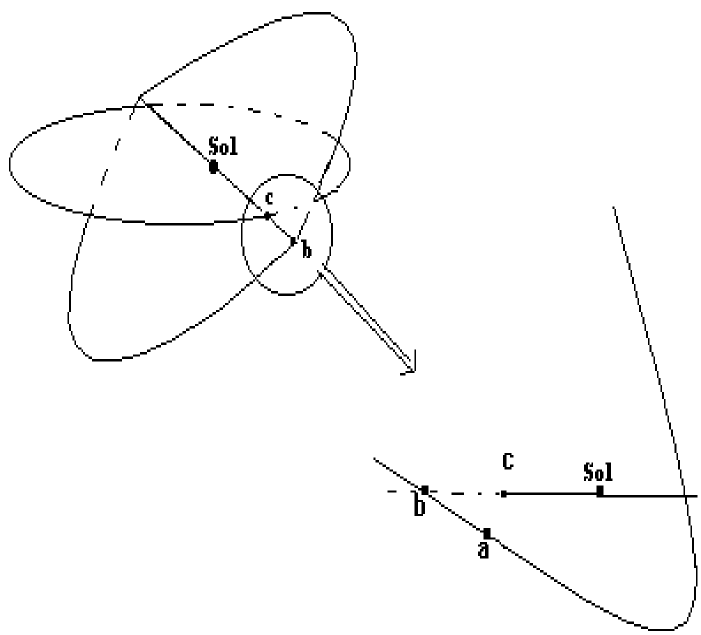


Fig. 3. El segmento ac define la distancia mínima absoluta entre la órbita del objeto y la órbita de la Tierra. Obsérvese que la distancia nodal está definida por el segmento bc y, por lo tanto, la distancia mínima absoluta es menor que la nodal. La distancia mínima absoluta es la menor distancia que puede existir entre un objeto celeste y la Tierra.

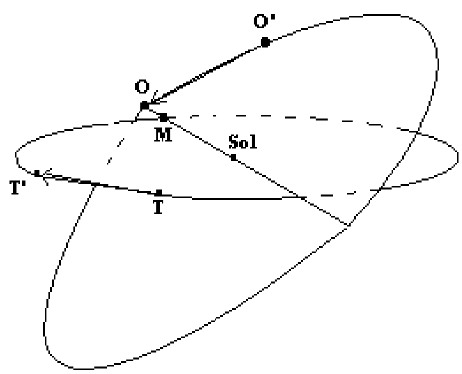


Fig.4. Ilustración del concepto de sincronización del movimiento del objeto con respecto a la Tierra. En un momento dado el objeto celeste "O" esta localizado exactamente sobre su mínimo absoluto respecto a la órbita de la Tierra. En ese momento la Tierra se encuentra en un punto cualquiera "T" de su órbita. El punto M es el mínimo absoluto de la Tierra respecto al objeto.

Esta distancia mínima circunstancial para cada ciclo del objeto sobre su órbita se define como un mínimo relativo. En la Fig. 5 se muestra la evolución de la posición de la Tierra cada vez que el objeto está en su mínimo absoluto. Los segmentos T'O, T''O, T'''O, $T^{iv}O$ y $T^{v}O$ definen las distintas distancias mínimas relativas que se producirán en los futuros ciclos del objeto.

La distancia mínima relativa es siempre mayor o igual a la distancia mínima absoluta. Por lo tanto, el hecho de que exista un mínimo absoluto no significa que este, se produce cada vez que el objeto hace un ciclo; existe otra variable en juego que es el parámetro ΔP. Obsérvese que la Tierra en la Fig. 5 se translada sobre su órbita en unidades o intervalos ΔP. Esto significa que este parámetro y la posición inicial de la Tierra (ciclo cero) determina si entre el objeto y nuestro planeta, se pueda producir una distancia igual a la mínima absoluta.

La Fig. 5 explica porque un cometa como Halley se vio extraordinariamente brillante y grande en 1910, y en la venida de 1985 se vio muy pobre en brillo y tamaño. Seguramente la Tierra estuvo en 1910 en un mínimo relativo pequeño con respecto al Halley cuando este objeto estaba en su mínimo absoluto. Por ejemplo, la Tierra pudo estar en una situación como la mostrada en la Fig. 5 en la posición T^{iv}, o, la posición T^{v}.

En 1936 el asteroide Apolo[7] se acercó a la Tierra a menos de dos veces la distancia Tierra-Luna. Sin embargo, se ha dicho que si la Tierra y el objeto hubiesen estado en una situación favorable, la distancia puede ser menos que de la distancia Tierra-Luna[8]. Esto se entiende gracias al modelo dado en la Fig. 5, ya que la distancia mínima relativa en las circunstancias de 1936, seguramente, corresponden a la posición T^{iv}, o, T^{v} de dicha figura; y la circunstancia que produce una distancia menor a la distancia Tierra-Luna, implica que la Tierra se localizaría en su respectivo mínimo absoluto respecto al asteroide, es decir, en la posición M de la Fig. 5.

[7]America Científica

[8] Asimov I., "Las amenazas al Planeta Tierra".

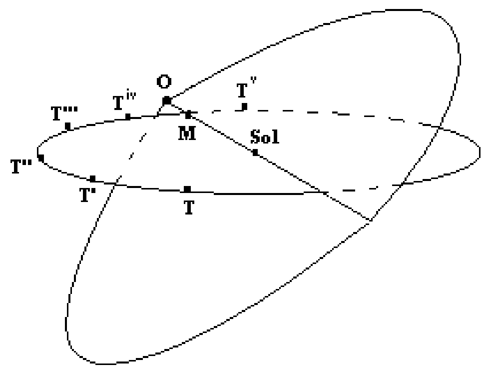


Fig. 5. Evolución de la posición de la Tierra cada vez que el objeto está en su mínimo absoluto. Los segmentos T'O, T''O, T'''O, T^{iv}O y T^{v}O definen las distintas distancias mínimas relativas que se producirán en los futuros ciclos del objeto.

8. CALCULO DE LA DISTANCIA MINIMA NODAL

Como puede verse en la Fig. 2 existen dos distancias nodales: una asociada al nodo ascendente y otra asociada al nodo descendente (segmentos ab y a'b'). A continuación se resumen los procedimientos para el cálculo de estas distancias.

a) Cálculo de la anomalía verdadera de la Tierra y el objeto sobre el nodo ascendente:

De la Fig. 6 se deduce que la anomalía verdadera del objeto y la Tierra sobre el nodo ascendente tienen la forma:

$$\nu o\ (NA) = -\ \omega o$$

$$\nu T\ (NA) = \Omega o - \Omega T$$

b) Calculo de la anomalía verdadera de la Tierra y el objeto sobre el nodo descendente:

De la Fig. 6 se deduce que la anomalía verdadera del objeto y la Tierra sobre el nodo descendente tienen la forma:

$$\nu o\ (ND) = 180 - \Omega o$$

$$\nu T\ (ND) = (\ \Omega o + 180\ ) - \Omega T$$

c) Cálculo de los radios vectores Sol - objeto y Sol - Tierra sobre el nodo ascendente:

$$Ro\ (NA) = \frac{Ao}{1 + eo\cos(\nu o\ (NA))}$$

$$RT\ (NA) = \frac{1}{1 + eT\ \cos(\nu T\ (NA))}$$

d) Cálculo de los radios vectores Sol - objeto y Sol - Tierra sobre el nodo descendente:

$$Ro\ (ND) = \frac{Ao}{1 + eo\cos(\nu o\ (ND))}$$

$$RT\ (ND) = \frac{1}{1 + eT\ \cos(\nu T\ (ND))}$$

e) Cálculo de la distancia nodal sobre el nodo ascendente:

$$D(NA) = Ro\ (NA) - RT\ (NA)$$

f) Cálculo de la distancia nodal sobre el nodo descendente:

$$D(ND) = Ro\ (ND) - RT\ (ND)$$

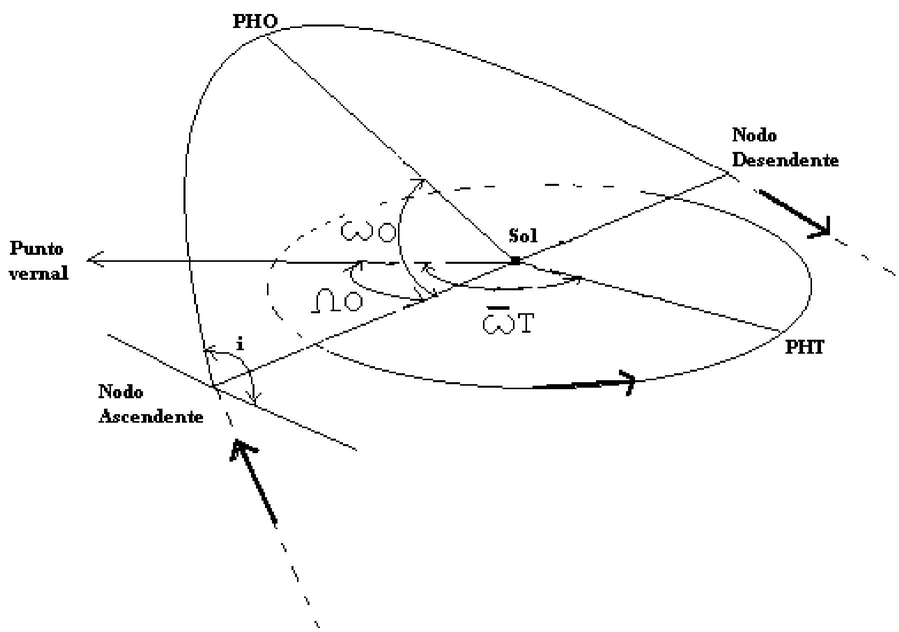


Fig. 6. Relación de los nodos con los elementos de órbita. El término PHT es el perihelio de la Tierra y PHO es el perihelio del objeto.

Es bueno observar que las relaciones de los apartes (e) y (f) permiten el cálculo de la distancia de los segmentos ab y a'b' de la Fig. 2, también, las relaciones de dichos apartes sólo valen sobre los nodos, y no se puede usar el mismo criterio para calcular la distancia entre el objeto y la Tierra. Esto último se debe a que en los nodos, los radios vectores son colineales. Es necesario tener en cuenta que si el objeto está es su nodo, no significa que la Tierra esté en su respectivo nodo, y, por lo tanto, la distancia nodal se verifica únicamente si el objeto y la Tierra, estuviesen simultáneamente en sus respectivos nodos (ascendente o descendente). Obsérvese que la distancia nodal esta afectada por un signo. Si el signo de la distancia nodal es positivo el objeto llega al nodo en un punto que está por fuera de la órbita Terrestre, en cambio, si el signo es menos, entonces, el objeto por dentro de la órbita de la Tierra cuando llega a su nodo.

9. CALCULO DE LA EPOCA DEL PASO POR LOS NODOS PARA LA TIERRA Y EL OBJETO.

A continuación se resumen los pasos para el cálculo de la época del paso por los nodos:

a) Cálculo de la anomalía excéntrica del objeto, EO(NA), y la Tierra, ET(NA), sobre el nodo ascendente. Este parámetro se obtiene por medio del despeje de la ecuación:

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{Eo\ (NA)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - \mathrm{eo})/(1 + \mathrm{eo})}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon\mathrm{o\ (NA)}}{2}\right)$$

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{ET\ (NA)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - \mathrm{eT})/(1 + \mathrm{eT})}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon\mathrm{T\ (NA)}}{2}\right)$$

Las anomalías verdaderas del objeto y la Tierra sobre los nodos se calcularon en la sección 8.

b) Cálculo de la anomalía excéntrica del objeto, Eo(ND), y la Tierra, ET(ND), sobre el nodo descendente. Este parámetro se obtiene por medio del despeje de la ecuación:

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{Eo\ (ND)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - \mathrm{eo})/(1 + \mathrm{eo})}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon\mathrm{o\ (ND)}}{2}\right)$$

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{ET\ (ND)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - \mathrm{eT})/(1 + \mathrm{eT})}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon\mathrm{T\ (ND)}}{2}\right)$$

c) Cálculo de la anomalía media del objeto y de la Tierra sobre el nodo ascendente:

$$\mathrm{MO(NA)} = \mathrm{EO(NA)} + \left(\frac{180\ \mathrm{eo}}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{EO(NA)}\ ]$$

$$\mathrm{MT(NA)} = \mathrm{ET(NA)} + \left(\frac{180\ \mathrm{eT}}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{ET(NA)}\ ]$$

d) Cálculo de la anomalía media del objeto y de la Tierra sobre el nodo descendente:

$$\mathrm{MO(ND)} = \mathrm{EO(ND)} + \left(\frac{180\ \mathrm{eo}}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{Eo(ND)}\ ]$$

$$\mathrm{MT(ND)} = \mathrm{ET(ND)} + \left(\frac{180\ \mathrm{eT}}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{ET(ND)}\ ]$$

Es bueno observar que los valores de las **anomalías medias** del objeto y la Tierra **deben mantenerse entre 0 y 360°**.

e) Cálculo del intervalo de tiempo entre el nodo ascendente del objeto y el perihelio del objeto, y el intervalo de tiempo entre el nodo ascendente del objeto y el perihelio de la Tierra:

$$\Delta t_o(NA) = MO(NA)/no$$

$$\Delta t_T(NA) = MT(NA)/nT$$

f) Cálculo del intervalo de tiempo entre el nodo descendente del objeto y el perihelio del objeto, y el intervalo de tiempo entre el nodo descendente del objeto y el perihelio de la Tierra:

$$\Delta to(ND) = Mo(ND)/no$$

$$\Delta tT(ND) = MT(ND)/nT$$

Donde no y nT es el movimiento diario del objeto y la Tierra.

g) Cálculo de la fecha del paso por el nodo ascendente del objeto y de la Tierra:

$$To(NA) = \Delta to(NA) + EPHo$$

$$TT(NA) = \Delta tT(NA) + EPHT$$

Donde EPHo y EPHT es la época del paso por el perihelio del objeto y de la Tierra respectivamente.

h) Cálculo de la fecha del paso por el nodo descendente del objeto y de la Tierra:

$$To(ND) = \Delta to(ND) + EPHo$$

$$TT(ND) = \Delta tT(ND) + EPHT$$

10. DEFINICION Y CALCULO DEL PARAMETRO ΔT(NODAL): Número de días que le falta a la Tierra para llegar a su nodo cuando el objeto está en su nodo.

Un parámetro de utilidad práctica para los estudios de las radiantes meteóricas asociadas a cometas, es el parámetro ΔT que se define como el número de días que le falta a la Tierra para llegar al nodo ascendente o descendente del objeto cuando el objeto se encuentra en la zona de los nodos.

a) Cálculo del ΔT para la zona del nodo ascendente:

$$\Delta T\ (NA) = To(NA) - T\ T(NA)$$

b) Cálculo del ΔT para la zona del nodo descendente:

$$\Delta T\ (ND) = To(ND) - T\ T(ND)$$

Es bueno hacer notar que un valor negativo del ΔT significa que la Tierra le faltan días para llegar a su respectivo nodo ascendente o descendente respecto al objeto, cuando el objeto se encuentra en su nodo. En cambio, un valor positivo del ΔT significa que la Tierra hace días que dejó su nodo cuando por fin el objeto llegó a su respectivo nodo.

11. CALCULO DE LA DISTANCIA MINIMA ABSOLUTA ENTRE UN OBJETO CELESTE Y LA TIERRA

El cálculo del valor de la distancia mínima absoluta se obtiene por tanteo partiendo de una situación en que el objeto y la Tierra se encuentran en alguno de los nodos. Resulta que el mínimo absoluto está en los alrededores del nodo. Por lo tanto, se hacen incrementos positivos y negativos de la anomalía verdadera del objeto y la Tierra entorno a la posición de partida siguiendo el procedimiento dado a continuación.

a) Se parte de una situación en que el objeto y la Tierra se encuentran en sus respectivos nodos ascendente o descendente. En general, la anomalía verdadera del objeto y de la Tierra se expresa como:

$$\nu_{k\,l}$$

Donde: ν = Anomalía verdadera para el objeto k situado en el nodo tipo l.

k = Indice indicador del objeto (k = o) o de la Tierra (k = T).

l = Indice indicador del nodo Ascendente (l = A) o del Descendente (l = D).

b) Se añade una cantidad pequeña ε al valor de la anomalía verdadera del objeto y de la Tierra. Esta cantidad puede ser positiva o negativa:

$$\nu_{o\,l} \pm \varepsilon$$

$$\nu_{T\,l} \pm \varepsilon$$

c) Determinación de la combinación de signos correctos para el cálculo de la distancia mínima absoluta:

c1) Cálculo de la distancia objeto-Tierra con la combinación + con +:

$$\nu_{o\,l} + \varepsilon$$

$$\nu_{T\,l} + \varepsilon$$

Con estos valores de la anomalía verdadera del objeto y la Tierra se procede a calcular la distancia objeto-Tierra por medio de las ecuaciones dadas en la sección 5 procedimientos (f) a (k). La distancia objeto-Tierra para la exploración de los alrededores del nodo tipo "l" se simbolizará como $\Delta_l\,(+,+)$.

c2) Cálculo de la distancia objeto-Tierra con la combinación + con -:

$$\nu_{o\,l} + \varepsilon\,, \qquad \nu_{T\,l} - \varepsilon \qquad \rightarrow \qquad \Delta_l\,(+,-)$$

c3) Cálculo de la distancia objeto-Tierra con la combinación - con -:

$$\nu_{o\,l} - \varepsilon\,, \qquad \nu_{T\,l} - \varepsilon \qquad \rightarrow \qquad \Delta_l\,(-,-)$$

c4) Cálculo de la distancia objeto-Tierra con la combinación - con +:

$$\nu_{o\,l} - \varepsilon\,, \qquad \nu_{T\,l} + \varepsilon \qquad \rightarrow \qquad \Delta_l\,(-,+)$$

En general la forma de la distancia objeto-Tierra se puede expresar como Δ_l(s1,s2), donde s1 y s2 representan los signos + o -.

c5) Se procede a escoger el Δ_l(s1,s2) que sea menor que la distancia nodal sobre el nodo tipo "l". Esto da la combinación de signos s1 y s2 que son requeridas para el cálculo de la distancia mínima absoluta.

d) Una vez establecido el signo de los incrementos ε, se procede hacer sucesivas adiciones de los mismos a las anomalías verdaderas y calcular en cada etapa la distancia objeto-Tierra. Este proceso continúa hasta que se consigue la menor distancia objeto-Tierra. Este es el mínimo absoluto del sistema objeto-Tierra.

Obsérvese que este tanteo debe ser aplicado a ambos nodos con el fin de obtener en este tanteo, la menor distancia. Es bueno observar, que este procedimiento da también la anomalía verdadera del objeto y de la Tierra sobre sus respectivos mínimos absolutos y que se simbolizan como: νo(Min.), νT(Min.). En la Fig. 6 se resume todo el procedimiento anterior.

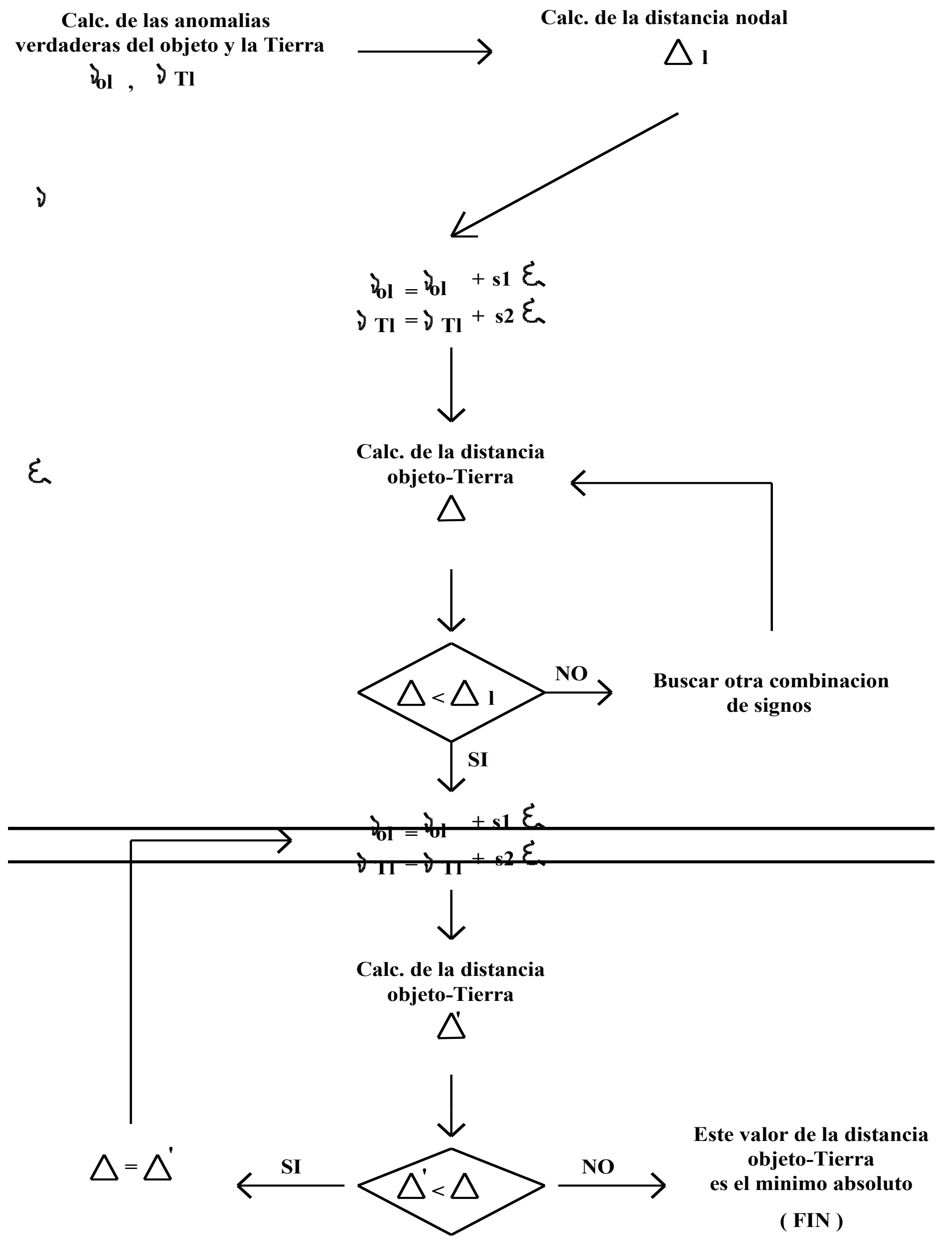


Fig. 6. Diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de la distancia mínima absoluta.

12. CALCULO DE LA EPOCA DEL PASO POR EL MINIMO ABSOLUTO DEL OBJETO.

A continuación se resumen los pasos para el cálculo de la época del paso por el mínimo absoluto de la Tierra y del objeto:

a) Cálculo de la anomalía excéntrica del objeto, EO(Min), y la Tierra, ET(Min), sobre el mínimo absoluto. Este parámetro se obtiene por medio del despeje de la ecuación:

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{EO\ (Min)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - eo)/(1 + eo)}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon o\ \mathrm{(Min)}}{2}\right)$$

$$\mathrm{Tan}\left(\frac{\mathrm{ET\ (Min)}}{2}\right) = \sqrt{(1 - eT)/(1 + eT)}\ \ \mathrm{Tan}\left(\frac{\upsilon T\ \mathrm{(Min)}}{2}\right)$$

Las anomalías verdaderas ν_o(Min) y ν_T(Min) se obtienen de la sección 12.

b) Cálculo de la anomalía media del objeto y de la Tierra sobre el mínimo absoluto:

$$\mathrm{MO(Min)} = \mathrm{EO(Min)} + \left(\frac{180\ eo}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{EO(Min)}\ ]$$

$$\mathrm{MT(Min)} = \mathrm{ET(Min)} + \left(\frac{180\ eT}{\pi}\right) \mathrm{sen}[\ \mathrm{ET(Min)}\ ]$$

Es bueno observar que los valores de las **anomalías medias** del objeto y la Tierra **deben mantenerse entre 0 y 360°**.

c) Cálculo del intervalo de tiempo entre el mínimo del objeto y el perihelio del objeto, y el intervalo de tiempo entre el mínimo de la Tierra y el perihelio de la Tierra:

$$\Delta t_o(Min) = MO(Min)/no$$

$$\Delta t_T(Min) = MT(Min)/nT$$

Donde no y nT es el movimiento diario del objeto y la Tierra.

d) Cálculo de la fecha del paso por el mínimo del objeto y de la Tierra:

$$T_o(Min) = \Delta t_o(Min) + EPHo$$

$$T_T(Min) = \Delta t_T(Min) + EPHT$$

Donde EPHo y EPHT es la época del paso por el perihelio del objeto y de la Tierra respectivamente.

13. DEFINICION Y CALCULO DEL PARAMETRO ΔT(MINIMO): Número de días que la falta a la Tierra para llegar a su mínimo cuando el objeto está en su mínimo.

Un parámetro de utilidad práctica para los estudios de posibilidad de choque entre la Tierra y un objeto celeste, es el parámetro ΔT(Min) que se define como el número de días que le falta a la Tierra para llegar a su mínimo absoluto cuando el objeto se encuentra en su mínimo absoluto. El valor de ΔT(Min) se obtiene por medio de la ecuación:

$$\Delta T\ (Min) = T_o(Min) - T_T(Min)$$

Es bueno hacer notar que un valor negativo del ΔT significa que la Tierra le faltan días para llegar a su respectivo mínimo, cuando el objeto se encuentra en su nodo. En cambio, un valor positivo del ΔT significa que la Tierra hace días que dejó su mínimo cuando por fin el objeto llegó a su respectivo mínimo.

14. CALCULO DE LAS FECHAS DE LOS MINIMOS RELATIVOS, LOS ΔT(MINIMO) Y LOS MINIMOS RELATIVOS ACTUALES Y FUTUROS DEL OBJETO RESPECTO A LA TIERRA.

A continuación se resumen las ecuaciones que permiten el cálculo de los sucesivos mínimos relativos y ΔT(Min) que se producirán en los futuros ciclos completos del objeto entorno a su órbita respecto al mínimo absoluto.

a) Cálculo de la fecha en que el objeto está en su mínimo absoluto:

$$T(n,Min) = T_o(Min) + n\ PO$$

Donde n es el número del ciclo respecto a su mínimo absoluto y PO es el período del objeto.

b) Cálculo de la anomalía media del objeto y la Tierra cada vez que el objeto está es su mínimo:

$$MO(n,Min) = MO(Min)$$

$$MT(n,Min) = [\ T(n, Min.) - EPHT\ ]\ nT$$

Donde nT es el movimiento diario de la Tierra. Obsérvese que la anomalía media del objeto no depende de n, esto se debe a que el objeto al completar un ciclo, se encuentra siempre en su mínimo. Es bueno también observar que la anomalía media de la Tierra se debe mantener entre 0 y 360° antes de pasar a la etapa siguiente de cálculos.

c) Cálculo de la diferencia de anomalías medias de la Tierra:

$$\Delta M = MT(Min) - MT(n,Min)$$

d) Cálculo del número de días que le falta a la Tierra para llegar a su mínimo:

$$\Delta T(n,Min) = \frac{\Delta M}{nT}$$

e) Cálculo de las distancias mínimas relativas:

Con el valor de las anomalías medias del objeto y la Tierra, ahora es posible calcular la distancia objeto-Tierra, cada vez que el objeto está en su mínimo. Este cálculo se hace por medio de los procedimientos resumidos en las secciones 6 y 7.

15. CALCULO DE LAS FECHAS DE LOS PASOS POR EL NODO, LOS ΔT(NODALES) Y LAS DISTANCIAS OBJETO-TIERRA ACTUALES Y FUTURAS.

A continuación se resumen las ecuaciones que permiten el cálculo de los sucesivos mínimos respecto a los nodos y ΔT(Nodal) que se producirán en los futuros ciclos completos del objeto entorno a su órbita respecto al nodo (ascendente o descendente).

a) Cálculo de la fecha en que el objeto está en su nodo:

$$T(n,NODO) = T_o(NODO) + n\ PO$$

Donde n es el número del ciclo respecto a su nodo y PO es el período del objeto.

b) Cálculo de la anomalía media del objeto y la Tierra cada vez que el objeto está es su nodo:

$$MO(n,NODO) = MO(NODO)$$

$$MT(n,NODO) = [\ T(n, NODO) - EPHT\ ]\ nT$$

Donde [ΔP] es la parte decimal de la diferencia del período del objeto menos el de la Tierra, nT es el movimiento diario de la Tierra. Obsérvese que la anomalía media del objeto no depende de n, esto se debe a que el objeto al completar un ciclo, se encuentra siempre en su nodo. Es bueno también observar que la anomalía media de la Tierra se debe mantener entre 0 y 360° antes de pasar a la etapa siguiente de cálculos.

c) Cálculo de la diferencia de anomalías medias de la Tierra:

$$\Delta M = MT(NODO) - MT(n,NODO)$$

d) Cálculo del número de días que le falta a la Tierra para llegar a su nodo:

$$\Delta T(n,NODO) = \frac{\Delta M}{nT}$$

e) Cálculo de las distancias objeto-Tierra cada vez que el objeto está en su nodo:

Con el valor de las anomalías medias del objeto y la Tierra, ahora es posible calcular la distancia objeto-Tierra, cada vez que el objeto está en su nodo. Este cálculo se hace por medio de los procedimientos resumidos en las secciones 6 y 7.

16. EL PROGRAMA MIN1/FORTRAM

El programa MIN1 permite hacer todos los cálculos sobre los nodos y el mínimo absoluto del objeto y la Tierra. Este programa tiene la estructura mostrada en los diagramas de las páginas siguientes. El programa necesita el apoyo de la subrutina JULIANOS que convierte la fecha Gregoriana en Juliana. La subrutina ANOMALIA que convierte la anomalía verdadera en anomalía media. La subrutina FECHA que calcula la fecha Gregoriana para los distintos eventos notables. La subrutina XYZ calcula, usando como datos las anomalías verdaderas, la distancia objeto-Tierra. Esta subrutina calcula las coordenadas eclípticas heliocéntricas de la Tierra y el objeto para una dada fecha. La subrutina KEPLER convierte la anomalía media en anomalía excéntrica por medio de la resolución de la ecuación de Kepler, y luego esta se transforma en anomalía verdadera.

El diagrama de flujo del programa MIN1 está desplegado en las siguientes páginas, y el listado del programa está en el anexo. **Es bueno hacer notar que el programa MIN1 no puede aceptar fechas Gregorianas antes del 0.5/ENERO/1600**, sin embargo, si se tiene la fecha del EPHO en días julianos, se puede usar perfectamente el programa. Esta limitación se debe a que la subrutina encargada de convertir la fecha Gregoriana en días Julianos (subr. JULIANOS), tiene como fecha de partida a 1600.0.

PROGRAMA MIN1/FORTRAN

1

↓

Anomalia Media
en los Nodos
MONA, MTNA
MOND, MTND → **SUBR. ANOMALIA**

↓

Dias entre el PHO y su Nodo
DTNA, DTND

↓

Fecha Juliana del paso
del Objeto por su Nodo

TONA = EPHO + DTNA
TOND = EPHO + DTND

↓

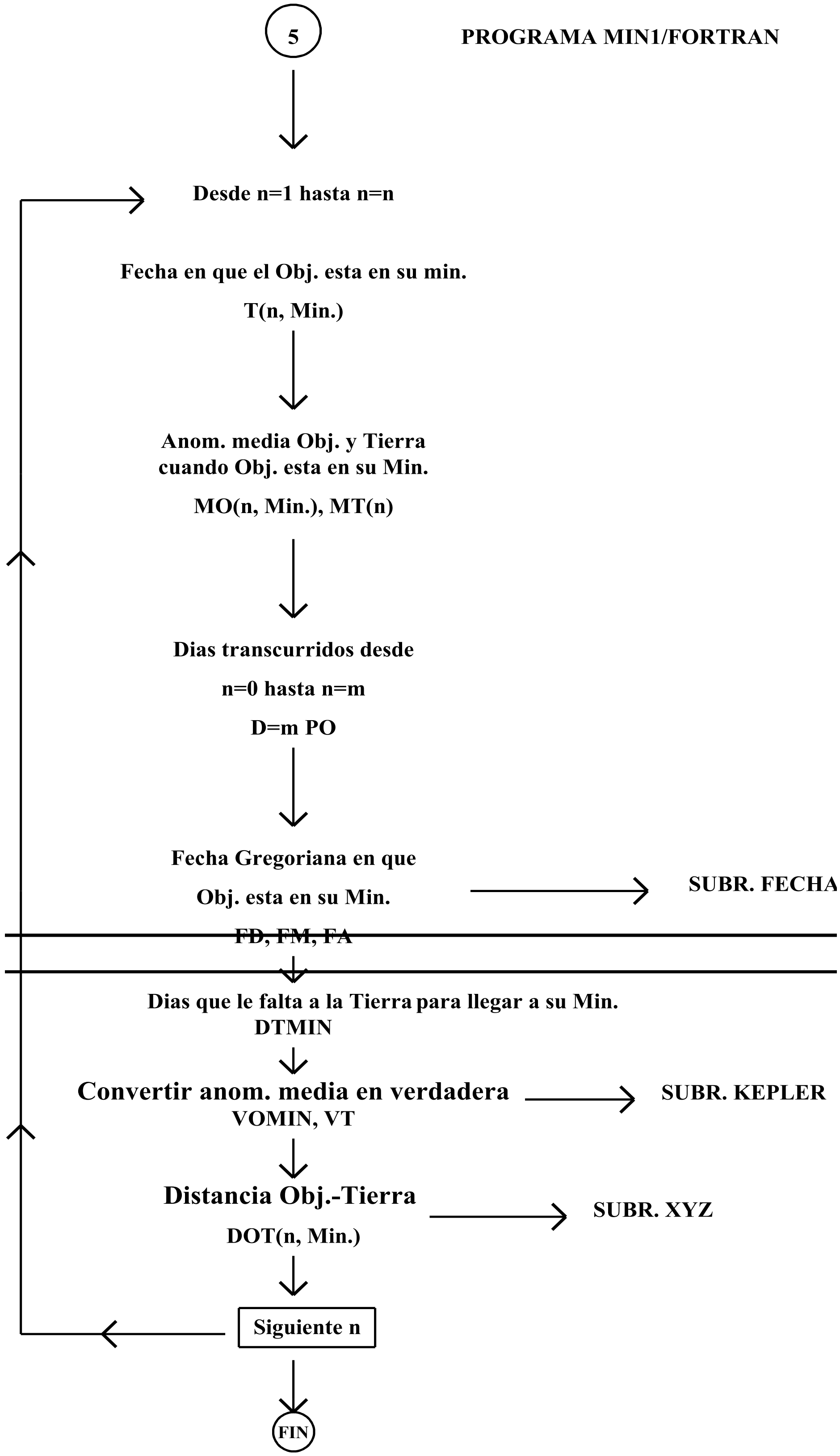
Fecha Gregoriana del Paso
del Objeto por su Nodo → **SUBR. FECHA**

GOD1, GOM1, GOA1
GOD2, GOM2, GOA2

↓

2

PROGRAMA MIN1/FORTRAN



ANEXO

LISTADO DEL PROGRAMA

MIN1/FORTRAN