

RECOMENDACIÓN UIT-R S.670-1*

Flexibilidad en la ubicación de los satélites como objetivo de diseño

(1990-1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la flexibilidad en la ubicación de los satélites puede aumentar la eficacia de la órbita de los satélites geoestacionarios;
- b) que la ubicación flexible de los satélites puede, en ciertos casos, mejorar la probabilidad de éxito en la coordinación de frecuencias;
- c) que la reubicación puede afectar al diseño de los satélites en lo que respecta al tiempo de vida útil y al compromiso entre zona de cobertura y características de funcionamiento;
- d) que la reubicación de los satélites afectará a las operaciones en el sector terreno y puede obligar a modificar la orientación de un gran número de estaciones terrenas que no dispongan de instalaciones de seguimiento;
- e) que el número de veces que se efectúe la reubicación debe ser limitado, de tal forma que se reduzca al mínimo la interrupción de los servicios prestados;
- f) que cambiar el orden de los satélites dentro de un arco determinado de la órbita de los satélites geoestacionarios, probablemente supondrá mayores inconvenientes que modificar ligeramente sus separaciones;
- g) que la posibilidad de elegir la reubicación en vez de cualquier otra técnica dependerá del carácter de las estaciones terrenas y espaciales afectadas;
- h) los análisis que figuran en los Anexos 1 y 2,

recomienda

- 1** que los satélites para las nuevas redes del servicio fijo por satélite estén concebidos para tener la flexibilidad de funcionar dentro de $\pm 2^\circ$ de su posición orbital nominal, o en toda la extensión de su arco de servicio, escogiéndose el valor que sea menor;
- 2** que las siguientes Notas se consideren parte integrante de esta Recomendación.

NOTA 1 – Se insta a las administraciones a que desarrollen nuevas tecnologías de satélite que permitan el funcionamiento de éstos dentro de $\pm 5^\circ$ de su posición orbital, o en toda la extensión de su arco de servicio, escogiéndose el menor de esos dos valores.

NOTA 2 – Por nuevas redes se entienden las redes cuya fecha de publicación anticipada sea posterior a 1990.

* La Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2001 de conformidad con la Resolución UIT-R 44 (AR-2000).

ANEXO 1

Flexibilidad en el emplazamiento de los satélites**1 Introducción**

La reubicación de los satélites es factible desde los puntos de vista técnico y operacional y se ha efectuado ya en la práctica con diversas clases de satélites. No obstante, la flexibilidad de la ubicación en la órbita presenta de hecho dificultades técnicas y operacionales. Las posibles ventajas y las dificultades de la reubicación de satélites se tratan en este Anexo.

Se consideran dos formas distintas de reubicación:

- a) una reducción de la separación actual de los satélites en la órbita, y
- b) una reevaluación completa de la secuencia de satélites en un arco orbital.

La ventaja de la alternativa a) es que los satélites pueden, en caso necesario, continuar transmitiendo a las estaciones terrenas que les siguen durante el proceso de reubicación, ya que los trayectos de los satélites no se cruzan. El inconveniente principal de dicho esquema es la exigencia de desplazar algunos satélites. Mientras que la forma b) puede requerir el movimiento de menos satélites que al trasladarse, probablemente, tendrán desplazamientos mayores y por tanto resultarán desfavorecidos en términos de interrupciones de servicio, consumo de combustible y modificación de la zona de cobertura que probablemente no sean aceptables desde el punto de vista de la explotación.

2 Eficacia de la órbita y consideraciones sobre el sistema

Hay que observar que no es posible afirmar con certeza qué zonas geográficas será necesario atender en el futuro desde una parte dada de la órbita. Por lo tanto, sólo se podrán aprovechar plenamente las ventajas de este método de optimizar la utilización de la órbita si las redes están concebidas de forma que los satélites puedan reubicarse, en caso necesario, dentro de un arco de servicio después de haber entrado en funcionamiento. Esta posibilidad de reubicar los satélites después de entrar en servicio podría ser también de gran ayuda para dar cabida en la órbita a los nuevos satélites de redes no previstas. La reubicación puede resultar más rentable que otras soluciones técnicas del tipo de antenas perfeccionadas de estación terrena o de nuevas y sofisticadas técnicas de modulación.

No obstante, es difícil actualmente evaluar la viabilidad técnica y la rentabilidad de montar redes de satélite que logren una flexibilidad considerable en cuanto a la posición orbital. La reubicación de los satélites en su arco de servicio debe ser aceptable durante la fase de diseño conceptual, mientras que durante la fase de desarrollo y fabricación, los cambios orbitales deben reducirse a límites predeterminados en los que la penalización técnica y de coste resulte razonable (y aceptable). Esto puede determinarse únicamente en cada caso individual. En la actualidad, una capacidad de reubicación de los satélites de $\pm 2^\circ$ respecto a la posición orbital nominal parece factible. Los sistemas en explotación no deben trasladarse en la órbita a menos que dicho movimiento se realice voluntariamente y todo aumento de la interferencia impuesto por la necesidad de dar cabida a nuevos sistemas debe orientarse según las Recomendaciones UIT-R.

3 Posibles problemas que presenta la reubicación de satélites

3.1 Limitaciones del arco de servicio

Tal vez sea necesario trasladar un satélite de una posición orbital a otra dentro de su arco de servicio, después de la entrada en servicio, a fin de permitir el acceso de una nueva red. La mejora del acceso a la órbita obtenida de este modo será mayor si el arco de servicio es largo. Sin embargo, la provisión de un arco de servicio largo puede tener un efecto considerable en el diseño óptimo de una red, en particular de las antenas de haz puntual del satélite, y puede tener alguna repercusión en la calidad.

El arco de servicio de los satélites que atienden a zonas muy extensas en longitud será reducido porque su arco de visibilidad es pequeño. Una forma posible de ampliar el arco de servicio es la subdivisión de la zona de servicio entre dos satélites, muy separados en la órbita y conectados por enlaces entre satélites. No obstante este método resultaría costoso.

Se ha observado que los satélites de aplicaciones polivalentes pueden proporcionar servicios, además de los ofrecidos por el servicio fijo por satélite, y estas otras aplicaciones pueden determinar la posición orbital requerida. Por ejemplo, es posible que en los servicios meteorológicos el concepto de arco visible no tenga importancia.

3.2 Antenas de la estación terrena

Un cambio en la posición del satélite exigiría reajustar la orientación de la antena de la estación terrena, así como (para la polarización lineal) el plano de polarización. No obstante, con pequeñas antenas de estación terrena y con satélites mantenidos en posición dentro de $\pm 0,1^\circ$ Este-Oeste y Norte-Sur, tal vez no sea necesario que las antenas de la estación terrena se desplacen para seguir al satélite en funcionamiento normal. Muchas estaciones terrenas pequeñas no dispondrán de personal técnico constantemente presente. Cada vez habrá más redes que se limiten a antenas con seguimiento manual y únicamente a una gama limitada de ajuste de la orientación del haz. Así pues, incluso un pequeño cambio en la posición del satélite podría presentar graves problemas mecánicos y de explotación, con las visitas consiguientes del personal técnico a todas las estaciones terrenas de la red e interrupciones del servicio. Los cimientos de la antena deben diseñarse de forma que permitan atender al peor caso de los cambios de orientación para todo emplazamiento de la estación terrena y todo arco de servicio.

Los cambios en la elevación de la antena de la estación terrena podrían afectar a la relación G/T en cielo despejado y a la intensidad de las degradaciones de propagación. Estos efectos pueden ser significativos en los climas de lluvia intensa y en donde el ángulo de elevación de la estación terrena es pequeño. Deben aumentarse, siempre que sea necesario, los márgenes de la p.i.r.e. de los enlaces ascendentes y descendentes para tener en cuenta la posibilidad de que haya que trasladar el satélite. El efecto de la reducción de los ángulos de elevación sobre los márgenes del sistema puede ser considerable, según la frecuencia de explotación.

Las variaciones del ángulo de elevación de la antena de la estación terrena, del acimut y de la p.i.r.e. podrían invalidar la coordinación con las estaciones terrenas que funcionan en las mismas bandas de frecuencias. Por lo tanto, en el proceso inicial de coordinación de frecuencias sería conveniente tener en cuenta los posibles desplazamientos futuros del satélite.

Los cambios del ángulo de elevación van acompañados de una modificación del ángulo acimutal. El cambio puede variar desde un valor muy pequeño, en el caso de las estaciones terrenas de latitudes altas, a 180° en las estaciones terrenas situadas sobre el Ecuador y cerca del punto subsatélite. Sin

embargo, desde el punto de vista del sistema tienen más importancia los cambios del ángulo de elevación, pues influirán en las variaciones de la pérdida en el trayecto y en los márgenes de desvanecimiento exigidos en condiciones de desvanecimiento.

3.3 Reorientación de la puntería de la estación terrena

3.3.1 Generalidades

El efecto más patente en la red de estación terrena sería la necesidad de cambiar la puntería de antena y el ángulo de polarización. Se estima que sólo es un problema importante para las antenas que no tienen capacidad de seguimiento. Los desplazamientos del orden de 10° en bandas compartidas con la red terrenal pueden dar lugar a problemas de coordinación.

3.3.2 Reorientación de la puntería de las antenas muy pequeñas

La p.i.r.e. de los satélites del SFS está en aumento y pronto se podrán emplear receptores en el suelo con antenas de menos de 1 m de diámetro. La facilidad con la que personas con experiencia escasa o nula pueden reorientar la puntería de las antenas depende en gran manera del tamaño y del tipo de antena utilizada. Sin embargo, la necesidad de ajustes de la polarización puede plantear un problema a menos que se utilice la polarización circular.

3.3.3 Reorientación de la puntería de las antenas de 1 a 2 m

En el caso de los satélites de potencia media se utilizan generalmente receptores terrenos equipados con antenas de 1 a 2 m de diámetro sin capacidad de seguimiento.

Con tales antenas será necesario modificar la puntería y la orientación de la polarización en las transmisiones de polarización lineal. Las antenas de montaje polar simplifican sobremanera el desplazamiento entre distintas posiciones de satélite y se utilizan cada vez más en asociación con equipo automático de nueva puntería y ajuste de la polarización.

3.3.4 Reorientación de la puntería de antenas de 2 a 5 m

En las bandas en 14/11 GHz una antena de ese tamaño tiene un haz estrecho y por tanto es probable que esté dotada de equipo de seguimiento, mientras que en 6/4 GHz una antena de este tamaño no es probable que tenga dicho equipo.

Se emplean con frecuencia antenas de este tamaño en el caso de satélites de baja potencia, o para recepción, fuera de la zona principal de cobertura de los satélites de mayor potencia. En este caso es más importante el hecho de que las antenas con insuficiente gama de dirección tengan problemas en lo que respecta a la fijación de una nueva puntería.

Cualquier movimiento del satélite fuera de sus límites nominales de mantenimiento de la estación conducirá a notables problemas operacionales para tales servicios, con independencia de la lentitud con que cambie la posición del satélite.

Sería impracticable que las antenas de esta categoría fueran ajustadas por personas no experimentadas, de manera que habría que dedicar el tiempo y el dinero suficientes para que técnicos capacitados se ocuparan de todos los terminales implicados, pudiendo necesitarse de centenares a millares de técnicos. Esto podría ser una empresa de gran envergadura y no debe subestimarse.

3.3.5 Estaciones terrenas de haz múltiple

En algunos sistemas de satélites múltiples se trata de emplear estaciones terrenas de haz múltiple para el acceso simultáneo a más de un satélite. Si proliferan esas estaciones terrenas, el movimiento admisible de un satélite con respecto a los demás del sistema quedaría fuertemente limitado.

3.3.6 Interrupción del servicio

Si, al desplazarse desde su antigua posición a la nueva, el satélite ha de pasar por la posición orbital de otro satélite que funciona en las mismas bandas de frecuencias, puede producirse interferencia si ambas redes siguen en funcionamiento. Además, la mecánica del desplazamiento puede obligar a desactivar temporalmente algunos de los subsistemas principales del satélite que cambia de posición, por ejemplo, fijando en posición los paneles solares o las antenas durante el traslado, o haciendo difícil el control preciso y continuo de actitud. Por lo tanto, podrían darse circunstancias en que parte o la totalidad del tráfico cursado normalmente por el satélite tenga que reencaminarse durante el periodo de reubicación, que puede durar varios días.

Algunas de estas dificultades podrían evitarse si hubiese un satélite de reserva en órbita. Sería entonces posible situar el satélite de reserva en la nueva posición de servicio y transferirse éste de uno a otro, orientando debidamente las antenas de la estación terrena.

Desde los puntos de vista operativo y comercial una consideración importante es el tiempo durante el que puede producirse una interrupción en el curso de la reubicación de un satélite. Dependerá de la cantidad de combustible que pueda emplearse para esa finalidad, de que se disponga de un satélite de reserva en órbita y de que se requiera un cambio longitudinal. En algunos casos, el tiempo necesario para reorientar la puntería a todas las estaciones terrenas puede resultar un factor crítico.

3.4 Zonas de cobertura y antenas de satélite

Una consecuencia del desplazamiento del satélite de una posición a otra sería la modificación de las zonas de cobertura en el suelo. El grado de influencia de ese factor en el rendimiento general dependerá de numerosos factores, entre los que figuran el empleo de satélites de haz único o múltiple, el tamaño de los haces, la amplitud con la que se desplaza el satélite y el grado de posible cambio de puntería de las antenas de satélite.

Con una nueva puntería del satélite hacia el centro nominal del haz, puede observarse claramente que las zonas de cobertura sólo difieren ligeramente en los extremos. En el caso más desfavorable, es decir, cerca del Ecuador, habría que aumentar la abertura del haz de antena aproximadamente el doble que en latitudes más altas. Esta diferencia será mayor en el caso de haces conformados que en el de haces puntuales.

Normalmente una antena de satélite está diseñada para ofrecer una cobertura óptima a una zona geográfica determinada desde una posición específica de la órbita de los satélites geostacionarios. Si el satélite debe tener un gran arco de servicio, normalmente será necesario disponer de capacidad para cambiar la orientación de los haces mientras el satélite está en órbita. Además, sería necesario conformar la sección transversal del haz de forma que su proyección en la superficie de la tierra cubra las zonas de servicio desde cualquier punto del arco de servicio. Por lo tanto, lo más probable es que la ganancia de los haces del satélite sea inferior a la que se obtendría si su forma estuviese optimizada para una sola posición orbital. En consecuencia, puede producirse también una gran tendencia a interferir a otras redes de satélite y una mayor exposición a la interferencia.

Para las zonas de servicio extensas a cualquier frecuencia en la gama de las microondas, y para las zonas de servicio más pequeñas a las frecuencias superiores de microondas, la utilización de sistemas de antena compuestos reconfigurables con haces constituidos por un gran número de haces secundarios de alta ganancia, ofrece una solución eficaz para dirigir los haces y reajustar sus secciones transversales, de forma que se mantenga la calidad del sistema y no se agrave la situación de interferencia.

Para las zonas de servicio más reducidas, se utilizarán más corrientemente haces puntuales convencionales. Los datos conocidos indican que, para los sistemas de satélite supuestos, con una capacidad de reubicación de $\pm 10^\circ$ se llegaría a una penalización en la calidad del satélite que no superaría 1 dB y a una penalización en cuanto a la interferencia que no excedería de 2 dB. En una situación práctica, una reubicación menor resultaría suficiente para lograr las ventajas adecuadas. Mantenerse dentro de estos límites de penalización supone probablemente los siguientes requisitos:

- los haces del satélite deberán ser orientables alrededor del eje de cabeceo del satélite. Cuando el satélite tenga un solo haz, puede obtenerse el control suficiente del eje de cabeceo permitiendo cierto sesgo al sistema de control de actitud del satélite. Cuando hay varios haces, puede ser necesario dirigirlos en cabeceo de forma independiente;
- en algunas circunstancias, será necesario orientar los haces alrededor del eje de balanceo del satélite; los factores que probablemente hagan más necesario el control del balanceo son:
 - el tamaño reducido de la zona de cobertura del haz; por ejemplo un diámetro equivalente de 200 km o menos;
 - una zona de servicio de latitud alta;
 - una gran diferencia entre la longitud del satélite y la de la zona de servicio.

Orientar los haces múltiples de antena de satélites generados por un reflector único presenta una dificultad adicional que aumenta al reducirse el tamaño del haz. Este problema será particularmente grave en las bandas de frecuencias superiores, donde pueden necesitarse antenas de satélite de alta ganancia para superar las pérdidas de propagación.

Aun disponiendo de los medios para orientar los haces en cabeceo y balanceo, la disminución de la calidad de funcionamiento de la red puede exceder de 1 dB si existe una gran diferencia entre la longitud del satélite y la de la zona de servicio.

Estas conclusiones se basan en estudios que suponen que las zonas de servicio son aproximadamente cuadradas.

La situación se facilita considerablemente si la antena del satélite puede optimizarse hasta la nueva zona de servicio durante las fases posteriores de fabricación o incluso cuando se halla en órbita. Si tales técnicas existen, pueden realmente derivarse ventajas de la ocupación de una posición de órbita con ángulos de elevación moderados.

3.5 Eclipse solar

Los satélites que no cuentan con la suficiente capacidad de baterías para mantener el servicio durante todo el eclipse pueden verse limitados a posiciones orbitales en las que el eclipse se produce fuera de los periodos de tráfico cargado. Esta limitación debe evitarse en el servicio fijo por satélite, siempre que sea posible, proporcionando la suficiente capacidad de batería para mantener todos los servicios durante el eclipse.

3.6 Combustible necesario para cambiar la posición orbital

El factor que determina la capacidad y velocidad con la que un satélite puede moverse en una órbita es la cantidad de combustible de mantenimiento en posición que puede utilizarse para esas finalidades. Para un satélite de tamaño medio, el desplazamiento de 10° en unas 24 h requiere el combustible de mantenimiento en posición de un año.

Conviene, por tanto, limitar el número y la extensión de las reubicaciones de un satélite para no imponer penalizaciones demasiado severas en cuanto a cobertura de la antena y combustible de mantenimiento en posición.

El combustible necesario para reubicar un satélite en la órbita está en función de la velocidad orbital, de la duración del tránsito, de la masa del vehículo espacial y de la eficacia de la propulsión. La maniobra se realiza aplicando al satélite dos incrementos de velocidad, $+\Delta V$ y $-\Delta V$ separados por el periodo de tiempo de reubicación. El Anexo 2 describe los cálculos de una serie de maniobras de reubicación en órbita utilizando las ecuaciones clásicas del movimiento orbital. Una reubicación rápida para reducir al mínimo la perturbación del tráfico implicaría una penalización considerable en cuanto al combustible de mantenimiento en posición, que repercutiría en la vida útil del vehículo espacial.

Evidentemente, los comentarios anteriores se aplican sólo a las reubicaciones posteriores al lanzamiento. Las reubicaciones anteriores al lanzamiento supondrán, en general, una penalización de combustible y de tiempo considerablemente inferior a la de los desplazamientos en la OSG, pues sólo exigirán cambios incrementables en el perfil del lanzamiento.

3.7 Control durante la reubicación

La órbita de transferencia para reubicar un satélite es ligeramente elíptica, con el perigeo (para el traslado de Este a Oeste) y el apogeo (para el traslado en sentido opuesto) tangentes a la OSG. Por lo tanto, el satélite parecerá que oscila respecto a los ejes de la OSG. Si es necesario pasar en ruta junto a otros satélites, debe tenerse en cuenta la posibilidad muy remota de colisión. Este es otro factor al determinar la velocidad de deriva de la reubicación y cualquier cambio temporal de la inclinación.

También es necesario coordinar las señales de seguimiento, telemetría y telemando cuando el satélite se encuentra en proximidad radial a otros satélites.

Para los satélites con grandes estructuras abiertas – por ejemplo, paneles solares o antenas desplegadas – también puede ser necesario tener en cuenta los esfuerzos de aceleración sobre estas estructuras, al determinar la velocidad de deriva y la actitud del satélite durante la maniobra.

3.8 Otros problemas identificados

Se han identificado otros problemas, pero no se han estudiado y es poco lo que puede decirse por el momento. Son los siguientes:

- si el satélite ha de operar en una banda de frecuencias planificada, por ejemplo, la banda de radiodifusión por satélite en 12 GHz, así como en el servicio fijo por satélite, tal vez no pueda desplazarse libremente para coadyuvar a la entrada en órbita de un satélite nuevo del referido SFS. Pueden presentarse situaciones similares en otros casos en que se combinan distintos servicios en un satélite;

- pueden aparecer más limitaciones si se utiliza RF a bordo o algún otro tipo de sistema de seguimiento;
- no se ha evaluado el efecto de la reubicación en los satélites que utilizan enlaces entre satélites; ello debería ser tema de estudio.

4 Consideraciones sobre los satélites de segunda generación

Puede haber cierta oportunidad de modificar la posición orbital en el curso de la transición de una generación de sistema de satélite a la siguiente. Evidentemente es deseable mantener los servicios prestados en la misma posición orbital al pasar de una generación a la siguiente, pero teniendo en cuenta que en general existe un periodo de varios meses en el que pueden funcionar simultáneamente el satélite nuevo y el antiguo, es conveniente que la reubicación se logre durante ese periodo de transición en ciertas circunstancias.

5 Conclusiones

Se admite que, al diseñar un sistema con flexibilidad en la ubicación orbital, puede degradarse la calidad y aumentar el costo de los satélites, en especial porque puede exigir a menudo facilidades para reorientar los haces, a fin de mantener la cobertura requerida. Pueden surgir otros costos adicionales de explotación del sistema cuando se cambia la posición de un satélite en funcionamiento. No obstante, también es evidente que, si todas las redes de satélites tienen un arco de servicio grande, sería mayor la probabilidad de coordinar con éxito las nuevas redes no previstas. Por lo tanto, es conveniente alcanzar un equilibrio justo entre la flexibilidad de un arco de servicio grande y la reducción al mínimo de los costos del sistema.

También se reconoce que no es probable que se acepten cambios frecuentes en la posición del satélite, dado el costo en combustible del satélite y las pérdidas de tiempo de explotación. También puede producirse un aumento considerable en el costo del segmento terreno en algunas redes, y perturbaciones considerables de su explotación, debido a la necesidad de reorientar las antenas.

Las dificultades de cambiar la posición de un satélite pueden reducirse considerablemente, a menudo a un costo relativamente pequeño, si en el diseño y la coordinación de las estaciones terrenas y los satélites se tiene en cuenta desde el principio la necesidad eventual de cambiar la posición en algún momento después de la entrada en servicio, así como las necesidades de conectividad y arco de servicio de la red explotada.

Del análisis de las cuestiones tratadas en el § 3, se concluye que el sistema más prometedor, por su simplicidad y por presentar el mínimo de inconvenientes para los usuarios sería el de «separación reducida» mediante el que se trasladaría cada satélite a una distancia relativamente pequeña. Un valor de $\pm 2^\circ$ debería ser posible para los satélites que se valen de la tecnología actual. Los inconvenientes para los usuarios se reducirían al mínimo reubicando el satélite sólo una vez si es absolutamente necesario y, en ningún caso, más de una vez a lo largo de su vida útil.

En determinados casos, puede ser imposible cambiar las características de la antena del satélite una vez efectuado el lanzamiento: resultaría entonces preferible que el vehículo espacial estuviera diseñado de forma que los diagramas de cobertura de la antena se ajustasen lo más tarde posible en el proceso de fabricación de aquél.

ANEXO 2

Consumo de combustible en función de la velocidad de deriva y el desplazamiento angular para la reubicación de un vehículo espacial

Utilizando las ecuaciones normales del movimiento orbital y las ecuaciones de expulsión de masa del cohete, y suponiendo una aproximación normal por pequeños incrementos, puede deducirse el grupo de ecuaciones que figuran a continuación.

Dado un desplazamiento angular requerido de α° (positivo para el movimiento de Este a Oeste y negativo de Oeste a Este) que ha de realizarse en n periodos (días):

$$\frac{\alpha}{n} = \frac{P_t - P_0}{P_0} \times 360$$

ó

$$P_t = P_0 \left(1 + \frac{\alpha}{360 n} \right) \quad \text{s} \quad (1)$$

donde:

$$P_0: \text{ periodo normal} = 2\pi = \sqrt{\frac{r_1^3}{\mu}} \quad \text{s}$$

P_t : periodo durante la órbita de transferencia.

El semieje mayor A de la órbita de transferencia es:

$$A = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

ó

$$r_2 = 2A - r_1 \quad \text{km} \quad (2)$$

donde:

r_1 : radio de la órbita de los satélites geoestacionarios = 42 164 km

r_2 : radio en el apogeo de la órbita de transferencia (km).

El periodo de una órbita viene dado por:

$$P_t = 2\pi \sqrt{\frac{A^3}{\mu}} \quad \text{s} \quad (3)$$

donde:

μ : constante gravitatoria de la Tierra = $3,986 \times 10^{-5} \text{ km}^3/\text{s}^2$

Así pues, la magnitud r_2 puede determinarse a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3).

La velocidad orbital para una órbita circular viene dada por:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \quad \text{km/s} \quad (4)$$

Cuando se varía la energía de la órbita de forma incremental y la órbita se hace elíptica, puede demostrarse que la velocidad en el perigeo es:

$$V_1 = \sqrt{2\mu \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1 + r_2} \right)} \quad \text{km/s} \quad (5)$$

Por lo tanto, la velocidad incremental ΔV es:

$$\Delta V = V_1 - V_0 \quad \text{km/s} \quad (6)$$

Por último, la ecuación del cohete para la masa de propelente requerido viene dada aproximadamente por:

$$M_p \approx 2M_0 \frac{\Delta V}{gI_{sp}} \quad \text{kg} \quad (7)$$

donde:

g : aceleración debida a la gravedad en la superficie de la Tierra = 9,809 m/s²

I_{sp} : impulso específico de los motores de empuje

M_0 : masa original del vehículo espacial.
