

La Navegación Espacial



Capitán de Fragata **GABRIEL DIAZ RODRIGUEZ**

TRADUCCION DEL LIBRO "DUTTON'S NAVIGATION AND PILOTING", CAP. 45, DEL "UNITED STATES NAVAL INSTITUTE", ANNAPOLIS, MARYLAND.

La exploración del espacio es probablemente el más ambicioso proyecto emprendido por el hombre. El gobierno de los vehículos espaciales para esta exploración ha requerido conceptos completamente nuevos lo mismo que equipos únicos para apoyar las misiones. El vuelo espacial no tripulado demanda el apoyo en un medio completamente nuevo, donde el hombre está

libre de la gravedad, el viento, la atmósfera y otros fenómenos terrestres familiares. Las vastas distancias en el espacio traen nuevos problemas. Cuando pensamos que la luz y las ondas de radio que viajan de un punto a otro casi instantáneamente pero tarda 8.3 minutos la luz del sol en alcanzar la superficie de la tierra, y tarda 6 minutos el haz de un radar en rebotar en Marte y regresar a la Tierra.

Una multitud de problemas deben ser reunidos y resueltos con nuevos métodos y conceptos. Uno de estos nuevos conceptos se encuentra en el campo de la navegación espacial y la conducción, donde la posición no se puede determinar por las coordenadas familiares de latitud y longitud. Como se mencionó previamente, una nueva dimensión debe ser dotada y un nuevo desarrollo en el campo de la navegación debe compensarla.

La navegación espacial se efectúa mejor, empleando una combinación de instrumentos abordo y en tierra. Aunque los términos "Navegación" y "Guía" son empleados a menudo como sinónimos, ellos son apenas relacionados. La función de la Navegación espacial es doble, debe determinar la situación del vehículo espacial, la cual se puede definir en cualquier instante de tiempo como describiríamos el mo-

vimiento del vehículo espacial en una trayectoria de caída libre.

Además, la navegación espacial envuelve la determinación e indicación de la posición y velocidad del vehículo con relación a un sistema de coordenadas de referencia en un momento dado.

El problema de guía es determinar qué cambios se deben hacer a la trayectoria para controlar la posición y la velocidad, con el propósito de alcanzar algún punto determinado, y aparece cuando el problema de navegación se ha resuelto.

La guía es el proceso de mover el centro de masa del vehículo a lo largo de una trayectoria deseada.

La estabilidad y el control están asociados con el movimiento alrededor del centro de masa. La relación entre navegación y guía se ilustra en la Figura N° 1.

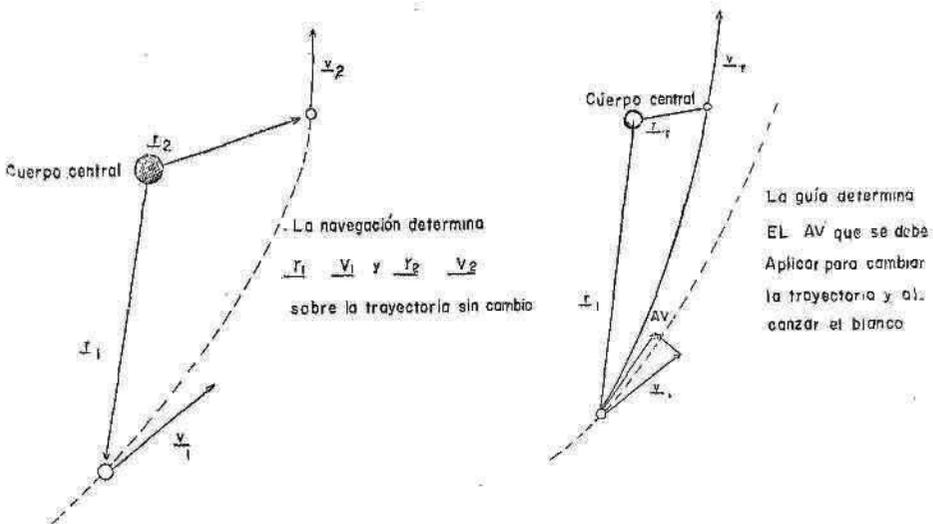


Figura No. 1 - CONCEPTOS SOBRE NAVEGACION Y GUIA

La navegación en el espacio no se puede definir tan claramente como se hace en la práctica marina o aérea.

Un vuelo orbital está ordinariamente dividido en tres "fases" y su navegación debe ser apropiada a cada una de éstas con sus diferentes parámetros.

Las fases orbitales son: la fase de estacionamiento, la fase de transición y la fase de curso medio.

La figura N° 2 nos muestra las tres fases orbitales de un vuelo espacial. Para todas las fases del vuelo del vehículo, uno de los más importantes requerimientos es el de que el Navegante

mantenga una buena graficación de la estima (D. R.), la cual es de suma importancia durante la fase de estacionamiento.

Las complejas matemáticas del vuelo espacial que contemplan mecánica espacial y las enormes velocidades comprometidas en el viaje, requieren el empleo de computadores para la navegación abordo.

El navegante es un importante eslabón en el sistema, ya que hace observaciones, introduce datos en el computador, ejerce su criterio e inicia la acción de guía.

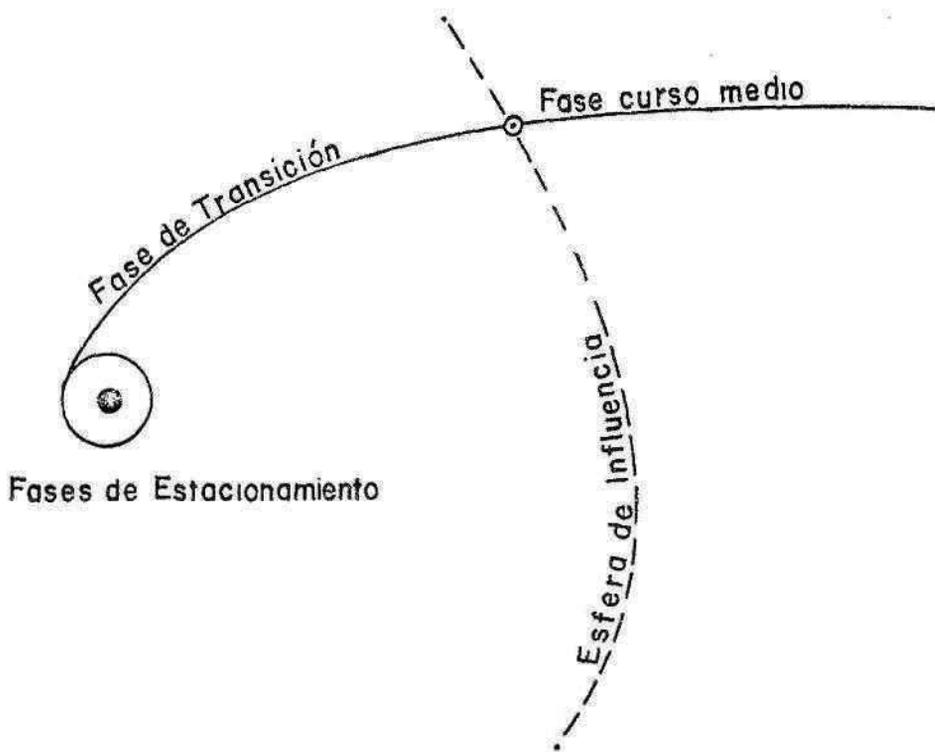


Figura No. 2 - FASES ORBITALES

Los cálculos complejos de velocidad y posición, son resueltos perfectamente por el computador.

El sistema de Navegación Espacial se ha dirigido hacia el desarrollo en exceso de instrumentos de medida y computadores relativamente sofisticados para técnicas de estimación estáticas, para resolver datos de los sensores de información de Navegación.

Los límites de exactitud de la Navegación, normalmente son determinados por el cálculo complejo y no por la exactitud del traqueo.

En la fase de estacionamiento, el vehículo espacial se encuentra cautivo en una órbita alrededor de un cuerpo celeste, siendo la atracción gravitacional del cuerpo la fuerza principal que lo mantiene en la órbita. En esta fase la Navegación a bordo es probablemente la más complicada, dependiendo de un sistema de referencia basado sobre un planeta, bien sea para sobrevivencia o para aterrizaje.

Normalmente, poca o ninguna guía se requiere en la órbita de estacionamiento.

La Navegación a bordo en la fase de estacionamiento del vuelo, se efectúa por diferentes métodos: uno está basado en medir el ángulo comprendido entre la línea de mira a una estrella y el limbo del disco de un planeta; claro está que esta práctica se ha limitado al planeta Tierra. La Figura Nº 3A, muestra la geometría de esta medición. Otro método consiste en determinar la medida angular entre la línea de mira

a una estrella y una marca en Tierra observable sobre un planeta cercano, como se ilustra en la Figura 3B. Un tercer método consiste en la determinación de la hora a la cual una estrella es ocluida por un planeta cercano, Figura Nº 3C. Un cuarto método consiste en medir el ángulo subtendido por el diámetro del disco visible de un planeta cercano; similar al principio para obtener distancias por estadímetro en la Navegación Marítima, partiendo de que el radio del planeta se conoce.

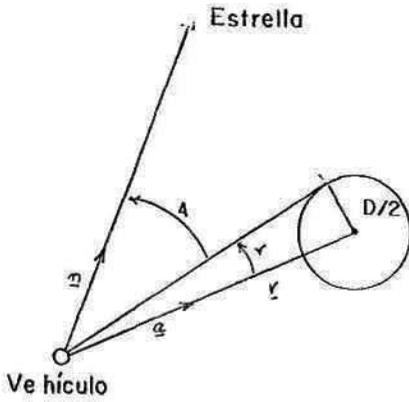
Con esta información, la distancia al vehículo espacial desde el centro del planeta se puede calcular. La Figura Nº 3D, muestra la geometría de esta medición.

La incertidumbre en el diámetro de los planetas produce errores de considerable proporción con este método.

Otro método de Navegación, en las cercanías de un planeta durante la fase de estacionamiento, es el de traquear en la Tierra marcas visibles sobre la superficie del planeta. El procedimiento actual seguido con este último método depende del conocimiento de la posición de las marcas terrestres.

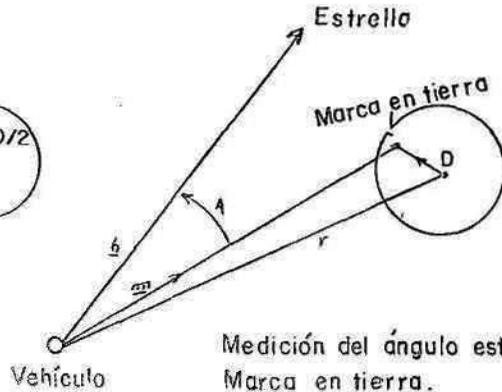
Una o más marcas terrestres se pueden emplear para dar parámetros orbitales, después se toman observaciones sucesivas durante una serie de órbitas alrededor del planeta. La principal ventaja de este método consiste en la presentación de la posición del vehículo espacial con relación a un sistema de coordenadas con referencia al planeta y siguiendo su movimiento;

Figura 3 a



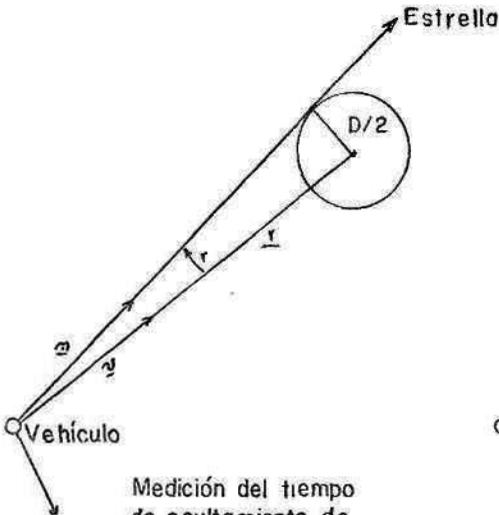
Medición del ángulo de elevación de la estrella (ángulo medido A)

Figura 3 b



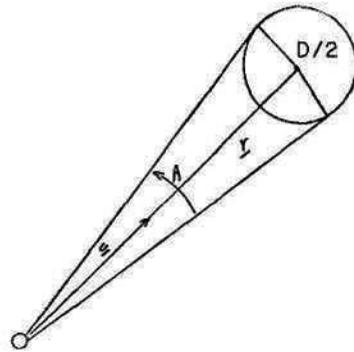
Medición del ángulo estrella Marca en tierra. (Ángulo medido A)

Figura 3 c



Medición del tiempo de ocultamiento de la estrella

Figura 3 d



Medición del ángulo subtendido por el cuerpo

su mayor desventaja se radica en que las marcas terrestres no siempre se distinguen fácilmente cuando el planeta posee una atmósfera.

Datos provenientes de los vuelos "Gemini" han demostrado que las marcas sobre la superficie de la tierra no siempre son visibles, aun en órbitas de baja altura. En todos los métodos citados y en particular en el último, es de extrema importancia mantener una buena graficación por estima (DR), con el fin de determinar la acción de guía requerida.

Un vehículo espacial se encuentra en la fase de transición del vuelo espacial, cuando se está escapando o se está aproximando a un cuerpo celeste. En esta fase su órbita es afectada primordialmente por el campo gravitacional del cuerpo; pero conserva suficiente energía para vencer la influencia de éste.

Para la navegación a bordo cuando se está en la fase de transición, se toma como referencia el centro del cuerpo celeste.

Los métodos utilizados son similares a los empleados al obtener una fija en la navegación Celeste Marina, usando instrumentos básicamente iguales al sextante marino.

Para la navegación en la vecindad de un planeta o durante la fase de transición, las técnicas a bordo tienen varias ventajas sobre la navegación con instrumentos en tierra. La principal ventaja consiste en evitar el retardo en las comunicaciones ya mencionado y

motivado por las extremas distancias involucradas.

Otra ventaja consiste en la de que el vehículo espacial se sitúa con relación al cuerpo en referencia, en lugar a hacerse con relación a la tierra.

Una vez que el vehículo espacial ha escapado de la influencia gravitacional de un cuerpo celeste, los parámetros orbitales son afectados principalmente por el arrastre del Sol. En esta fase el vehículo se desplaza en una órbita alrededor del Sol y las coordenadas de la navegación a bordo son generalmente escogidas con referencia al centro del Sol empleando los mismos instrumentos de la fase de transición.

Los métodos descritos se basan en su empleo a bordo del vehículo espacial.

Al mismo tiempo que se emplean estas técnicas a bordo, también se verifica la posición del vehículo espacial por medio de facilidades terrestres.

Las técnicas para la Navegación basada en la Tierra se fundamentan en el traqueo por radar del vehículo y órdenes de guía de comando se suministran por radio.

Aunque este método ha probado ser extremadamente confiable en el pasado y se incluye en los planes de las futuras misiones tripuladas y no tripuladas, tiene algunas desventajas definidas:

La principal desventaja se radica en el retardo de tiempo entre la recepción, el procesamiento y el suministro de la información para las órbitas diferentes a las terrestres.

Otra desventaja es la de que los radares de traqueo situados en la Tierra indican las distancias al vehículo espacial con referencia a la superficie de la Tierra, aunque el vehículo esté por ejemplo aproximándose o en órbita alrededor de la Luna.

Pequeñas incertidumbres o errores en las mediciones basadas en localidades terrestres pueden convertirse en grandes dudas para la navegación precisa requerida para situar el vehículo espacial.

La navegación efectuada a bordo es por consiguiente un requerimiento definido en las misiones tripuladas; la navegación con base en la tierra, el principal sistema para vuelos orbitales terrestres, probablemente servirá más como un sistema de retorno para las largas misiones del futuro. Los equipos de a bordo suministran datos exactos de los ángulos mientras que los radares terrestres darán información precisa sobre distancias.

Como se mencionó previamente, la navegación por estima juega un papel importante para mantenerse a través de las órdenes de guía requeridas durante las diferentes fases de la órbita del vehículo espacial.

La Navegación por estima espacial difiere de la Navegación por estima marina, en la terminología empleada y además por la dimensión adicional en la cual el vehículo viaja.

Mientras que el Navegante de Superficie se enfrenta principalmente con el tiempo y la rata de velocidad, el As-

tronauta debe aplicar adicionalmente los parámetros orbitales de la atracción gravitacional y la fuerza centrífuga. Con la aplicación apropiada de estos parámetros los cuales varían con la fase orbital del vuelo, la ruta orbital por estima (DR) debe ser calculada precisamente y comparada con la órbita presente, para determinar cualquier procedimiento de guía que sea requerido.

La Navegación por Inercia, de precisión se aplica al vuelo, especialmente durante el tiempo en el cual tiene lugar la aplicación de la mayor potencia, por ejemplo durante el lanzamiento, aterrizaje y cualquier maniobra de un cambio mayor en la órbita. Un Navegador por inercia provee la referencia principal durante el lanzamiento para colocar el vehículo en la órbita apropiada. La navegación por inercia no es conveniente para períodos largos en la navegación en el espacio profundo; principalmente porque los acelerómetros de inercia indican únicamente aceleraciones antigravitacionales. Es decir, no pueden medir la gravedad, la aceleración primaria aplicada al vehículo que viaja en el espacio. No se ha desarrollado un modelo aplicable de la gravedad del Sistema Solar.

Hemos descrito las tres fases principales de la navegación espacial. El programa de Navegación tripulada se ha desarrollado principalmente bajo control terrestre positivo, siendo imposible predecir con certeza qué método de Navegación será más satisfactorio.

Por consiguiente, describiremos a continuación los conceptos y las técnicas diseñadas para los vuelos "Apolo", estimando que reúne todos los requisitos.

Como este programa cubre el proyecto de exploración lunar, la guía y la Navegación están muy relacionados. Para ejecutar la misión principal, el vehículo pasa a través de quince fases diferentes de guía y navegación. De éstas, solamente once están directamente relacionadas con el vehículo "Apolo" propiamente dicho, las otras son para la guía y navegación del Módulo de Excursión Lunar (LEM) que aterriza en la Luna, Figura Nº 4.

Como este vuelo ocurre relativamente cerca de la Tierra, si se compara con los planes de la exploración futura planeada para el Sistema Solar y el espacio profundo, la Navegación primaria, incluyendo la predicción de la

información orbital futura se hace por medio de un sistema de traqueo con base en la tierra. Este sistema que emplea información de traqueo por radar y visual con retransmisión de información y órdenes de guía a voz o por radio, es un sistema probado, como se demostró en los vuelos "Mercurio", "Mariner", "Surveyor" y "Gemini".

Una representación gráfica de la operación de la red del sistema de traqueo para vuelos tripulados (MSFN) se muestra en la Figura Nº 5. El vehículo es traqueado por una antena de 85 pies la cual suministra distancia angular y velocidad. Esta información se transmite al centro de Control de la Misión en Houston, de la que se obtiene información para navegación. El vehículo también es traqueado por una antena de 30 pies la que emplea Doppler de 3 vías, información que suministra datos de posición y velocidad.

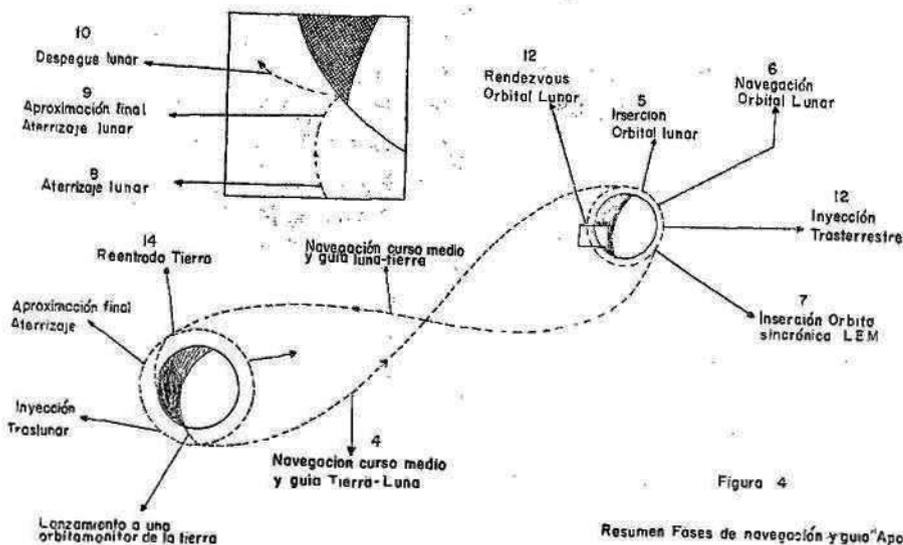


Figura 4

Resumen Fases de navegación y guía "Apolo"

Figura No. 4 — RESUMEN FASES DE NAVEGACION Y GUIA "APOLO"

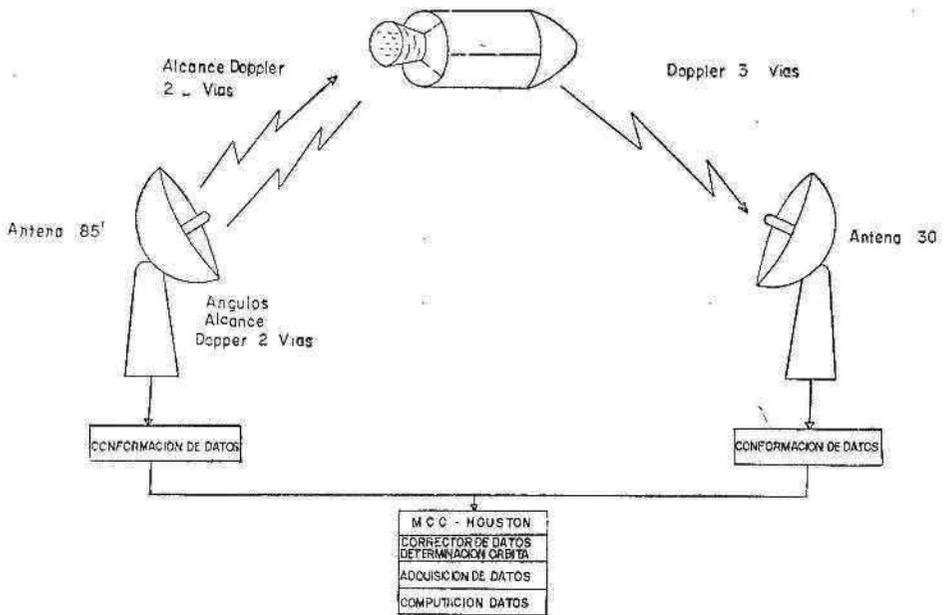


Figura No. 5 — SISTEMA TRAQUEO POR RADAR

La distancia determinada modulando la portadora con dígitos casuales (O y I).

La señal se recibe en transponders localizados en el vehículo espacial o en el LEM., y se retransmite. La medida del tiempo de tránsito de la señal es una medida de la distancia al vehículo espacial. La velocidad se determina por el desplazamiento Doppler en la señal devuelta por el vehículo espacial.

El sistema abordó es también esencial en el vuelo "Apolo". Esto no significa un retroceso en el sistema, sino más bien como un sistema independiente con las mismas capacidades del sistema de tierra. No está sujeto al posible Jamming, y se puede utilizar aún cuando el vehículo es inaccesible al

control terrestre, o cuando se encuentra en el lado oculto de la Luna. El sextante espacial es empleado en este método de navegación.

El sistema óptico se emplea para alinear el sistema de inercia, y para navegar en una órbita terrestre, órbita lunar o el espacio cislunar.

La unidad de medida de inercia se emplea como referencia de altura primaria y se emplea con propósito de guía durante todas las maniobras y durante el reingreso. Los datos son obtenidos por observación de líneas simultáneas a dos cuerpos celestes, o superponiendo la imagen de una estrella sobre una marca en tierra. El tiempo y la medida angular son leídas electrónicamente y alimentados dentro de un computador.

El sistema óptico del sextante espacial se muestra en la Figura N° 6.

El astronauta emplea el sextante para situar con precisión la estrella sobre la marca en tierra o el horizonte. Cuando la estrella y la marca en tierra están sobrepuestas, el astronauta presiona un botón y el ángulo entre los dos lo mismo que la hora, se introducen automáticamente en el computador.

La geometría para medir una fija de navegación en el espacio cislunar difiere de la tradicional en la navegación marina o aérea. Los ángulos medidos emplean tres estrellas y sus ángulos desde una marca terrestre o sobre el horizonte, forman tres conos en el espacio. La intersección de dos de esos conos forman una línea y la intersección con el tercero forma un punto.

El cálculo se efectúa automáticamente en el computador.

En el vuelo "Apolo" no se emplea el método convencional practicado por los marinos por cientos de años. V. g: los cálculos se basan en dos o más estrellas observadas y transportando las primeras rectas hasta la última y calculando la fija, lo cual podemos definir como técnica determinística.

En "Apolo", se usa una técnica recursiva (implica el empleo de la teoría del filtro Kolman); bajo este concepto, la precisión de la posición y la determinación de la velocidad mejoran a medida que se efectúan más y más observaciones, reduciendo la incertidumbre con cada observación. Este

método comprende técnicas de matemática estática. En resumen, en el vuelo "Apolo" los fijos son completamente diferentes a los de la Navegación Marítima.

Las dos ventajas principales que ofrece la navegación óptica, al compararla con cualquier método como radar o inercia, son: de que no se necesita gran demanda de potencia eléctrica, y de que no está sujeto al error acumulativo, el cual puede ser excesivo en los vuelos sin aceleración de gran duración, como es el período de desplazamiento durante la fase de curso medio de la órbita. Sensores fotométricos adicionales se incorporan al sextante para permitir el traqueo automático de las estrellas y las detección de la luz en la longitud de onda visual en la cual es radiada por la atmósfera del brillante horizonte de la tierra. El computador empleado en resolver las observaciones requiere una programación mínima y puede ser empleado simultáneamente para otros fines, tales como el de procesar los datos recibidos de la tierra.

Los problemas que se han presentado a raíz de la navegación abordo y la guía del vehículo espacial no tiene precedentes en el campo de la Navegación. El astronauta debe tener completa capacidad de independencia para situar su vehículo sin ayuda y sin referencia a la Tierra. Siempre habrá la necesidad de un método manual simple con el cual el astronauta pueda regresar a la Tierra, en el caso de una situación de emer-

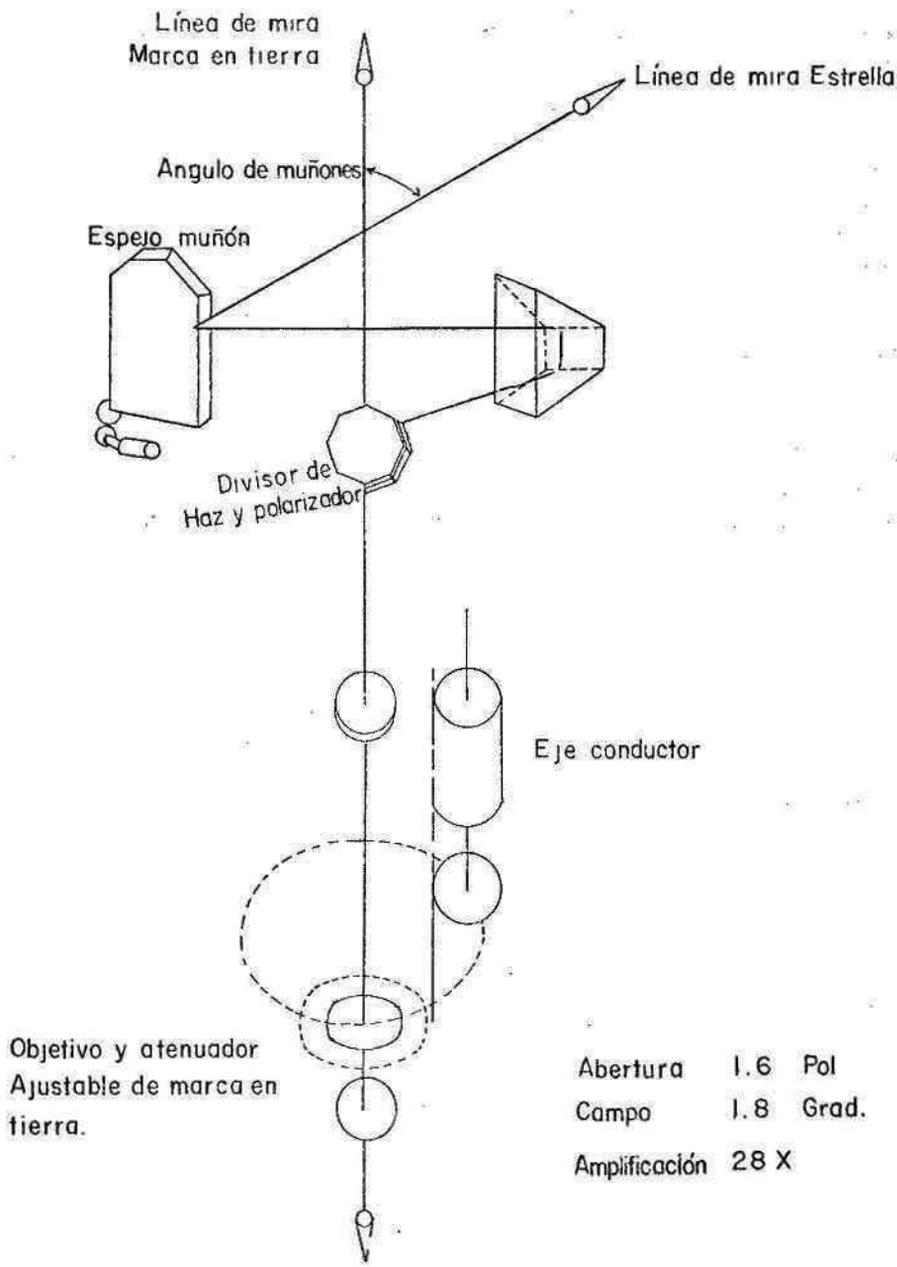


Figura No. 6 — Esquema del Sistema Optico del Sextante Espacial

gencia. La Figura N° 7., nos muestra las fases de la Navegación del vehículo de la Misión Apolo y sus capacidades; también muestra las fases de navegación para el Módulo de Excursión Lunar, el cual incluye el empleo del radar para el cumplimiento de su misión. El dibujo ilustra el empleo de los instrumentos ópticos para la navegación y para la alineación de la unidad de medición por inercia (IMU).

Todos los vuelos espaciales tripulados anteriores al proyecto "Apolo" incluían órbitas terrestres, siendo equivalentes a la fase de estacionamiento en el vuelo al espacio lunar. Para estos vuelos la navegación es mínima porque el vehículo espacial opera bajo las inflexibles leyes naturales que gobiernan

los cuerpos en órbita. Un repaso de los conceptos elementales de la mecánica espacial ilustran las leyes básicas que rigen los vuelos espaciales orbitales.

Un vehículo espacial permanece en el mismo plano en el cual es puesto en el momento del lanzamiento si no se le aplica una fuerza adicional. En cualquier instante de tiempo, este plano trazará un círculo máximo sobre la superficie de la tierra con un ángulo fijo de inclinación con respecto al plano ecuatorial de la tierra. Sin embargo, la rotación de la tierra dentro del plano de la órbita, causa un movimiento aparente al Oeste del plano de la misma, alrededor de la Tierra a una rata aproximada de 15° por hora.

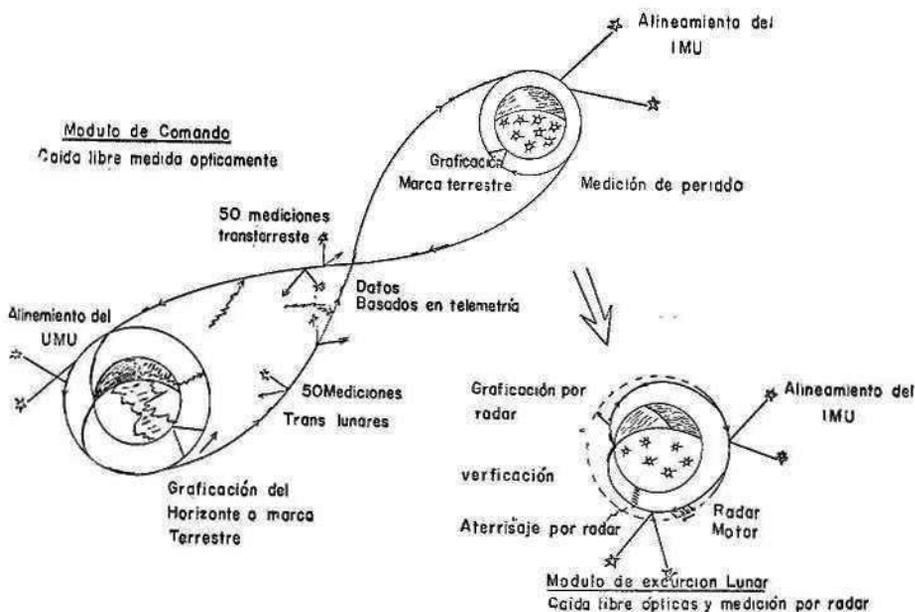


Figura No. 7 — FASES DE LA MISION DE NAVEGACION APOLO

En la caída libre la fuerza centrífuga es exactamente opuesta a la gravedad. El vehículo espacial no puede regresar a la Tierra ni escapar de su campo gravitacional, se requiere por consiguiente, una velocidad única para darle la altura de la órbita deseada. La distancia radial al vehículo espacial desde el centro de la tierra durante el perigeo, es el punto de mayor aproximación y junto con la excentricidad de la órbita, define el tamaño de la misma.

Un vehículo espacial en órbita, recorre áreas iguales del plano orbital en tiempos iguales. En una órbita elíptica, esto se manifiesta en una velocidad

variable para los diferentes puntos de la órbita, el cambio es mayor a medida que la elipse se alarga y mínimo cuando ésta se aproxima al círculo.

La Figura N° 8, muestra la relación entre un círculo y una elipse. Un objeto viajando a una velocidad constante alrededor de un círculo debe recorrer un número igual de grados y un área igual en el mismo tiempo. Arco AB = Arco BC.

Los Arcos AB y BC sobre la elipse no representan áreas iguales; por consiguiente, los vehículos espaciales no pueden emplear el mismo tiempo para recorrer los dos sectores.

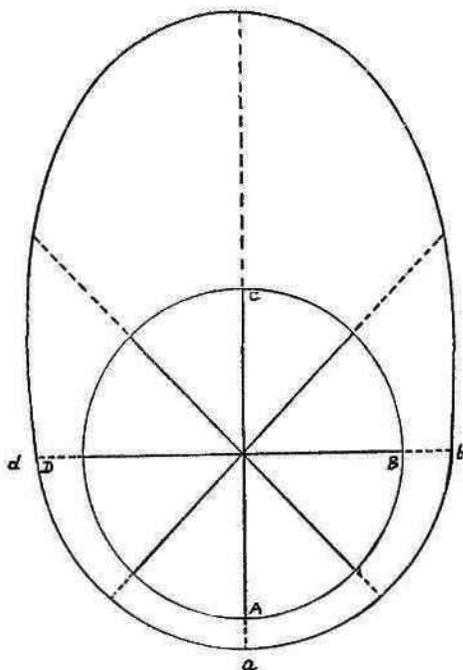


Figura No. 8 — RELACION ENTRE EL CIRCUITO Y LA ELIPSE

Un vehículo espacial que viaja en una órbita elíptica debe cambiar constantemente su velocidad. Si el piloto cambia la velocidad en un instante dado, la altura y la forma de la órbita cambia.

Teniendo en cuenta estos hechos, la órbita de un Satélite alrededor de un cuerpo esférico aislado, sin atmósfera, debe ser una elipse cuyo plano esté fijo con relación a las estrellas. La

elipse debe mantenerse fija en tamaño, forma y orientación.

La órbita de un Satélite alrededor de la Tierra se aparta de este concepto ideal a consecuencia de cuatro principales perturbaciones, así: causadas por el apartamiento del campo gravitacional de la tierra para una simetría esférica; la influencia del arrastre atmosférico, la atracción gravitacional Lunar y Solar, y la presión de la radiación Solar.



CASA OLIMPICA

AL SERVICIO DEL DEPORTE COLOMBIANO

CON EL MAS COMPLETO SURTIDO DE UNIFORMES Y ARTICULOS PARA EL DEPORTE.

ATENDEMOS SUS PEDIDOS DE CUALQUIER PARTE DEL PAIS

Calle 17 No. 6-12 - Teléfonos: 414451 - 345051 / 53 - Telégrafo "Olímpica" Bogotá, D. E.