

SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATELITE (GNSS)

Ref.:

- a.- Manual de Navegación Pub. SHOA 3030.
 - b.- Admiralty Manual of Navigation BRd 45 (3) “Navigation Systems, Equipment & Instruments. (1966)
-

- A.- Introducción
 - B.- Historia del GPS.
 - C.- Descripción del sistema.
 - D.- Concepto de obtención de posición con GPS.
 - E.- Funcionamiento del GPS.
 - F.- Exactitud
 - G.- Lo actual y futuro del GPS
 - H.- GPS en el Pilotaje.
 - I.- El concepto del GPS Diferencial (DGPS).
 - J.- SBAS, Sistema de Aumentación Basado en Satélites.
 - K.- Otros Sistemas de Navegación por Satélite.
-

A.- Introducción

- 1.- Un **sistema global de navegación por satélite** (Global Navigation Satellite System, **GNSS**) es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire. Estos permiten determinar las coordenadas geográficas y la altitud de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de constelaciones de satélites artificiales de la Tierra para fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos, agrícolas, y otras actividades afines.
- 2.- Un sistema de navegación basado en satélites artificiales puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas.
- 3.- Actualmente, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos de América y el Sistema Orbital Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS) de la Federación Rusa son los únicos que forman parte del concepto GNSS. El Panel de Sistemas de Navegación (NPS), el ente de la Organización Internacional de Aviación Civil encargado de actualizar los estándares y prácticas recomendadas del GNSS, tiene en su programa de trabajo corriente el estudio de la adición del sistema de navegación por satélite Galileo desarrollado por la Unión Europea.
- 4.- Otros sistemas de navegación por satélite que podrían ser o no adoptados internacionalmente para la aviación civil como parte del GNSS y que están en proceso de desarrollo son el Beidou, Compass o BNTS (BeiDou/Compass Navigation Test System) de la República Popular China, el QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) de Japón y el IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) de India.

5.- En estos apuntes se analizará principalmente el sistema de posicionamiento Global (GPS)

B.- Historia del GPS

El sistema **TRANSIT** fue el primer sistema de navegación basado en satélites y que entro en servicio en el año 1965.

Al principio de los 60 los departamentos de defensa, transporte y la agencia espacial norteamericanas (NASA) tomaron interés en desarrollar un sistema para determinar la posición basado en satélites.

El sistema debía cumplir los siguientes requisitos

- Globalidad, abarcando toda la superficie del globo
- Continuidad, funcionamiento continuo sin afectarle las condiciones atmosféricas
- Altamente dinámicas, para posibilitar su uso en aviación y precisión.

Esto llevó a producir diferentes experimentos como el Timation¹.

El sistema TRANSIT estaba constituido por una constelación de seis satélites en órbita polar baja a una altura de 1074 Km. Tal configuración conseguía una cobertura mundial pero no constante. La posibilidad de posicionarse era intermitente, pudiéndose acceder a los satélites cada 1.5 h. El cálculo de la posición requería estar siguiendo al satélite durante quince minutos continuamente. Ver figura N° 1.

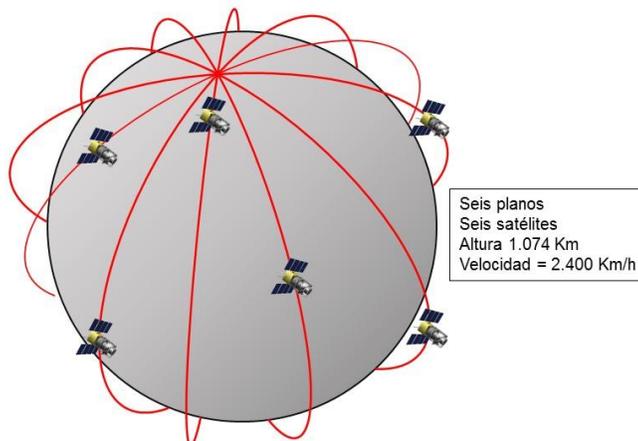


Fig.: N° 1 Constelación TRANSIT

¹ Los satélites Timation (se lanzaron el 1964, 1967, 1969) fueron concebidos, desarrollados y lanzados por el Laboratorio de Investigación Naval en Washington, DC. El concepto de Timation era para transmitir una referencia de tiempo precisa para su uso como una señal de que van a receptores en tierra. Los resultados de este programa y la Fuerza Aérea Proyecto 621B forman la base para el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). La contribución de la Armada para el programa GPS siguió centrada en los relojes cada vez más precisos.

TRANSIT trabajaba con dos señales en dos frecuencias, para evitar los errores debidos a la perturbación ionosférica. El cálculo de la posición se basaba en la medida continua de la desviación de frecuencia Doppler de la señal recibida y su posterior comparación con tablas y gráficos.

El error de TRANSIT estaba en torno a los 250 m. Su gran aplicación fue la navegación de submarinos y de barcos.

TRANSIT tenía muchos problemas. La entonces URSS tenía un sistema igual que el TRANSIT, de nombre TSICADA. Había que dar un gran salto. La guerra fría fomentaba invertir millones de dólares en un revolucionario sistema de navegación, que dejara a la URSS definitivamente atrás.

Debido a las limitaciones del TRANSIT, se concibió un sistema formado por 24 satélites en órbita media, que diera cobertura global y continua, que sería el GPS.

El primer satélite se lanzó en 1978, y se planificó tener la constelación completa ocho años después. Unido a varios retrasos, el desastre del transbordador Challenger paró el proyecto durante tres años.

Por fin, en diciembre de 1983 se declaró la fase operativa inicial del sistema GPS. El objetivo del sistema era ofrecer a las fuerzas de los EE.UU. la posibilidad de posicionarse (disponer de la posición geográfica) de forma autónoma o individual, de vehículos o de armamento, con un costo relativamente bajo, con disponibilidad global y sin restricciones temporales. La iniciativa, financiamiento y explotación corrieron a cargo del Departamento de Defensa de los EE.UU., el GPS se concibió como un sistema militar estratégico.

En 1984 un vuelo civil de Korean Airlines fue derribado por la Unión Soviética al invadir por error su espacio aéreo. Ello llevó a la administración Reagan a ofrecer a los usuarios civiles cierto nivel de uso de GPS, llegando finalmente a ceder el uso global y sin restricciones temporales, de esta forma se conseguía un retorno a la economía de los EE.UU. inimaginables unos años atrás. Además suponía un gran liderazgo tecnológico originando un vertiginoso mercado de aplicaciones.

Desde 1984, con muy pocos satélites en órbita, aparecieron tímidamente fabricantes de receptores GPS destinados al mundo civil.

El proyecto se desarrolló en distintas fases:

- Fase 1 (1973-1977): estudio de conceptos, diseño y viabilidad del proyecto.
- Fase 2 (1979-1988): producción del primer bloque de satélites que servirá para validar el sistema.
- Fase 3 (1989-1995): conseguir un segmento espacial plenamente operativo con el lanzamiento del segundo bloque de satélites. Se declara la Capacidad Inicial Operativa en 1993, y se declara la Plena Capacidad Operativa en 1995.
- Fase 4 (1996-2001): lanzamiento y desarrollo del tercer bloque de satélites, y operación y mantenimiento del GPS.

- Fase 5 (2002-2013): desarrollo de los nuevos satélites con mejores prestaciones que sustituirán a los antiguos, y lograr una constelación más robusta.

A partir de la caída de la Unión Soviética el Gobierno de los EEUU decide poner a disposición civil esta tecnología, aunque con ciertas limitaciones que no pongan en peligro a los EEUU como se ha explicado anteriormente.

El sistema pasó a estar completamente operativo en 1994, cuando se alcanzaron los 24 satélites que componían el segmento espacial, y con un gran número de estaciones de control operativas en todo el mundo.

En cuanto al futuro del GPS, Lockheed Martin está desarrollando actualmente una nueva serie de GPS III para mejorar la potencia de la señal, precisión y fiabilidad, lo que ayudará aún más con la navegación. La Boeing también está desarrollando una nueva tecnología GPS con 12 satélites pertenecientes a la serie IIF, los cuales tendrán una mayor precisión y mayor esperanza de vida.

C.- Descripción del sistema

El NAVigation System Timing And Ranging (NAVSTAR), Sistema de Posicionamiento Global (GPS), fue el primer sistema de radio-posicionamiento basado en el espacio, que provee a los usuarios convenientemente equipados, una gran exactitud en la posición y tiempo. Consiste en tres segmentos: espacial, de control y del usuario. Ver Figura N° 2.

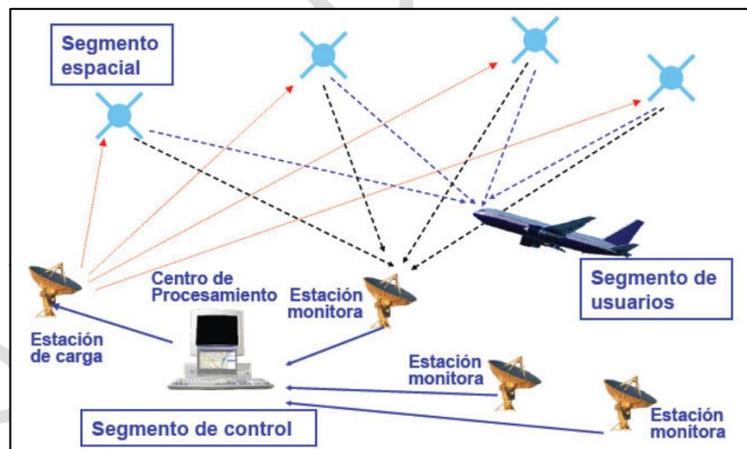


Fig.: N° 2 “Segmentos del GPS”

1.- Segmento espacial

Este segmento consiste en 24 satélites operacionales con tres satélites de repuesto activos en órbita.

Los satélites orbitan a una altura de 20.200 km, en seis planos orbitales separados, cada plano inclinado 55° respecto al ecuador. Los satélites completan una órbita en aproximadamente 12 horas.



Fig.: N° 3 “Constelación de 24 satélites”

Los satélites están espaciados de modo que habitualmente cuatro de ellos están, teóricamente, a la vista de cualquier usuario en cualquier parte del mundo. Cada satélite transmite señales en dos radiofrecuencias superpuestas, en las cuales hay:

- Datos de la predicción de las efemérides del satélite.
- Datos de corrección por propagación atmosférica.
- Información sobre error del reloj del satélite
- Datos sobre el estado del satélite.
- Superpuesto en los códigos va el mensaje de navegación.

Los satélites GPS transmiten códigos pseudoaleatorios.

Realmente, tanto los satélites como los receptores generan conjuntos de códigos digitales complejos. Estos códigos se han hecho complicados a propósito, de forma que se les pueda comparar fácilmente sin ambigüedad.

Otro beneficio del esquema del código pseudoaleatorio, es que todos los satélites del sistema pueden compartir la misma frecuencia, sin interferirse unos con otros. Cada satélite tiene su propio código pseudoaleatorio distintivo, así que diferenciar entre ellos es solamente cuestión de utilizar el código correcto durante el proceso de comparación en el receptor.

2.- Sistema de control

Consiste en una Estación Maestra de Control, un cierto número de estaciones monitorizadoras y de antenas terrestres ubicadas a través del mundo.

La Estación Maestra de Control, ubicada en Colorado Springs, tiene el equipamiento y los servicios necesarios para el monitoreo de los satélites, telemetría, traqueo, comando, control, generación de los mensajes de navegación y envío de estos mensajes a los satélites.

Las estaciones monitoras ubicadas en Hawai, Colorado Springs, Kwajalein, isla Diego García e isla Ascensión, traquean los satélites en forma pasiva, acumulando datos de las señales de los satélites sobre variaciones en distancia, y retransmitiéndolos a la Estación Maestra de Control; la cual procesa esta información, para determinar la posición del satélite y la exactitud de los datos de su señal, actualiza el mensaje de navegación de cada satélite y transmite estas informaciones a las antenas terrestres. Luego, las antenas terrestres transmiten estas informaciones a los satélites. Las antenas terrestres, ubicadas en islas Ascensión, Diego García y Kwajalein, también cumplen funciones para transmitir y recibir información para control de los satélites.

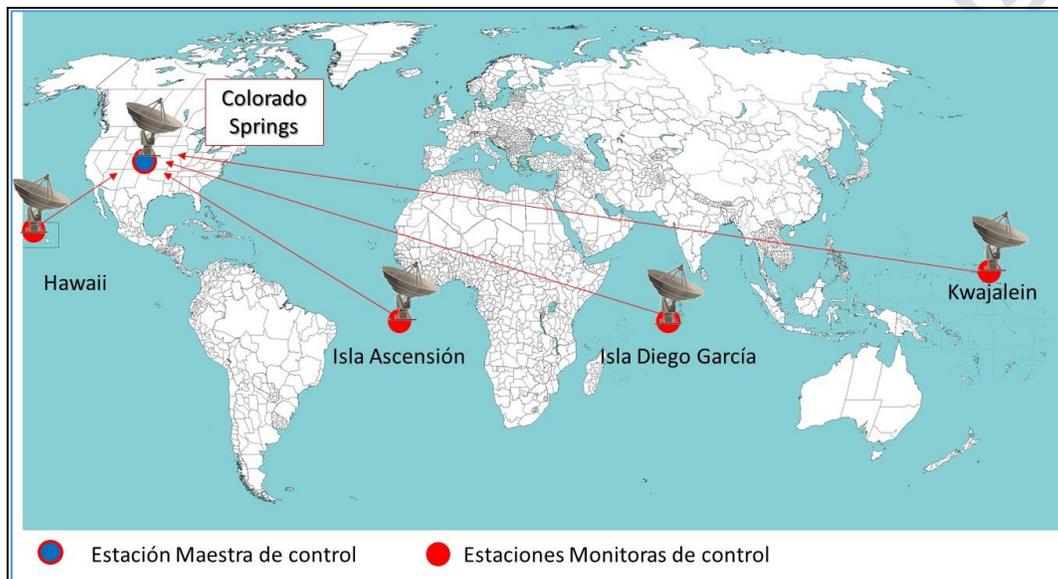


Fig. N° 4 “Segmento de control de GPS”

3.- Equipo receptor

Los equipos receptores de los usuarios están diseñados para recibir y procesar señales de cuatro o más satélites en órbita, ya sea simultáneamente o secuencialmente.

Luego, el procesador del receptor convierte estas señales en informaciones para la navegación. Como el GPS tiene aplicación en una amplia variedad de actividades, desde la navegación marítima hasta los levantamientos de terreno, los equipos receptores pueden variar enormemente en sus funciones y diseño.



Fig.: N° 5 “Modelos de receptores GPS”

D.- Concepto de obtención de posición con GPS.

El GPS mide distancias entre el satélite en órbita y un equipo receptor en Tierra; y en base a esas distancias, calcula “esferas de posición”. La intersección de esas esferas de posición, determinan la posición del equipo receptor.

La medición de las distancias se efectúa mediante la comparación de señales de tiempo generadas simultáneamente por los relojes internos del satélite y del equipo receptor. Esta señal, caracterizada por una forma de onda muy especial, se denomina código pseudoaleatorio, y son generadas moduladas en fase, en forma sincronizada por el satélite y el receptor. La señal del satélite llega al receptor después de un retardo proporcional a la distancia recorrida. Este retardo es detectado por la variación de la fase entre el código pseudoaleatorio recibido y el código generado por el receptor.

Conociendo el tiempo que tomó la señal en llegar al receptor desde el satélite, permite al receptor calcular la distancia desde el satélite. El receptor, por lo tanto, debe estar ubicado en la periferia de una esfera cuyo centro es el satélite y con un radio igual a la distancia medida. Con la intersección de tres esferas de posición, se obtienen dos posibles puntos donde puede estar ubicado el receptor. Uno de estos puntos es una solución absurda, ya que estará a cientos de millas de la superficie de la Tierra.

Teóricamente, no se requieren más de tres mediciones a distintos satélites del tiempo para obtener una situación con el GPS.

En la práctica, no obstante, se requiere de una cuarta medición para obtener una posición exacta con el GPS. Esto es debido al error del reloj del equipo receptor.

Las señales sincronizadas viajan desde el satélite al receptor a la velocidad de la luz. Un pequeñísimo error en la sincronización entre los relojes en el satélite y en el receptor, producirá un tremendo error en distancia. El reloj atómico del satélite tiene una precisión de 10^{-9} segundos y si se instalara un reloj similar con esa precisión en el receptor, haría que el valor del equipo fuera prohibitivamente caro. Por lo tanto, se ha sacrificado la exactitud del reloj del receptor y se debe efectuar una medición adicional a otro satélite.

Los pequeños computadores en los receptores de GPS, están programados de tal forma que cuando reciben una serie de mediciones que no pueden intersectarse en un solo punto, perciben que hay algo erróneo y suponen que la causa es que el reloj interno padece una desviación. Entonces, el computador empieza a restar (o a sumar) tiempo, la misma cantidad de tiempo a todas las mediciones. Así sigue recortando el tiempo hasta que logra una respuesta que permite que todas las distancias pasen por un punto. En esencia, el computador “descubre” que, corrigiendo cierta cantidad de tiempo a las mediciones, puede hacer que las circunferencias se corten en un punto, y de esto deduce la desviación del reloj.

Es importante hacer presente, que el número de líneas de posición requeridas para emplear esta técnica es función del número de líneas de posición requeridas para obtener una situación.

El GPS determina la posición en tres dimensiones; la presencia del error del reloj del receptor agrega una incógnita adicional. Por lo tanto, se requieren cuatro mediciones de tiempo para resolver las cuatro incógnitas.

E.- Funcionamiento del GPS

Los satélites GPS llevan relojes atómicos de alto grado de precisión. La información horaria se sitúa en los códigos de transmisión mediante los satélites, de forma que un receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal.

Esta señal contiene datos que el receptor utiliza para calcular la **ubicación de los satélites** y realizar los ajustes necesarios para precisar las posiciones. El receptor utiliza la **diferencia de tiempo** entre el momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite. El receptor tiene en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debidos a la ionosfera y a la troposfera. **Con tres distancias a tres satélites y conociendo la ubicación del satélite** desde donde se envió la señal, el receptor calcula su posición en tres dimensiones.

Sin embargo, para calcular directamente las distancias, el usuario debe tener un reloj atómico sincronizado con el Sistema de Posicionamiento Global. Midiendo desde un satélite adicional se evita que el receptor necesite un reloj atómico. **El receptor utiliza cuatro satélites para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo.**

La distancia a cada satélite es determinada haciendo uso de la siguiente forma.

$$PR = c \times \Delta t$$

c = Velocidad de la luz

Δt = Tiempo de recorrido de la señal desde el satélite al receptor

Siendo el diferencial de tiempo la variable que se exige mayor precisión.

Para determinar la distancia real de cada satélite se debe corregir la distancia de acuerdo a la siguiente fórmula (Ver Figura N° 6).

- R = Distancia real.
- PR = Distancia medida.
- c = Velocidad de la Luz.
- Δt_a = Retraso en la propagación y otros errores.
- Δt_u = Corrección de reloj del receptor a partir de tiempo de sistema GPS.
- Δt_s = Corrección de reloj de satélite a partir de tiempo de sistema GPS.

$$R = PR - c \times (\Delta t_a + \Delta t_u - \Delta t_s)$$

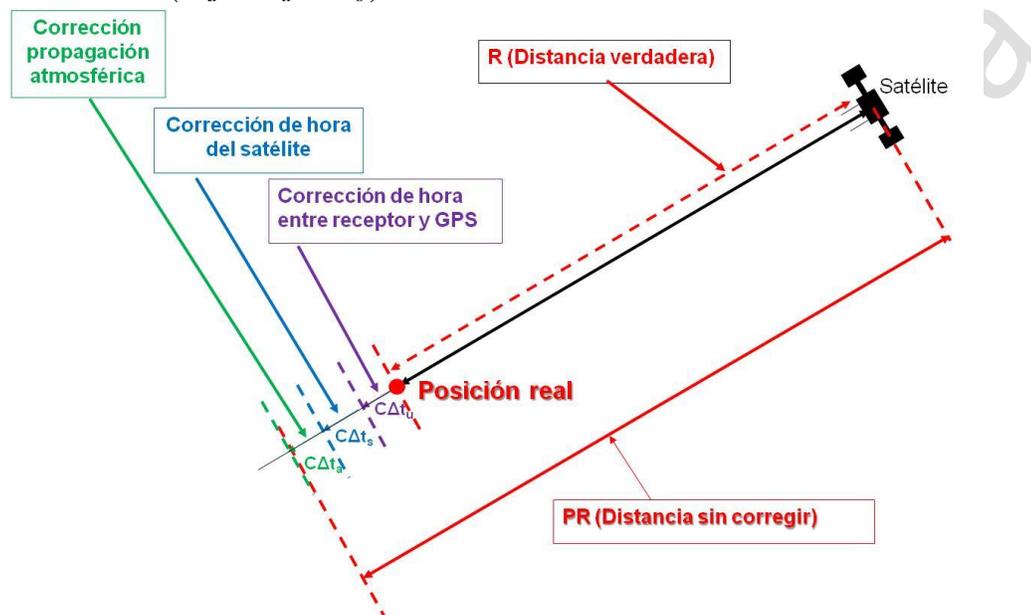


Fig. N° 6 “Distancia medida de un satélite”

El efecto de error de reloj de receptor, al utilizar tres satélites simultáneamente para obtener una posición, se muestra en la Figura N° 7. Las distancias no se cortan en un punto, produciéndose un área ABC. Cada satélite tiene su propio error Δt_u , el cual puede ser restado para cada satélite, cortando las señales en el punto “P”, que corresponde a la posición del usuario. Este error de reloj de receptor es calculado permanentemente desde el momento que se recibe la señal del satélite.

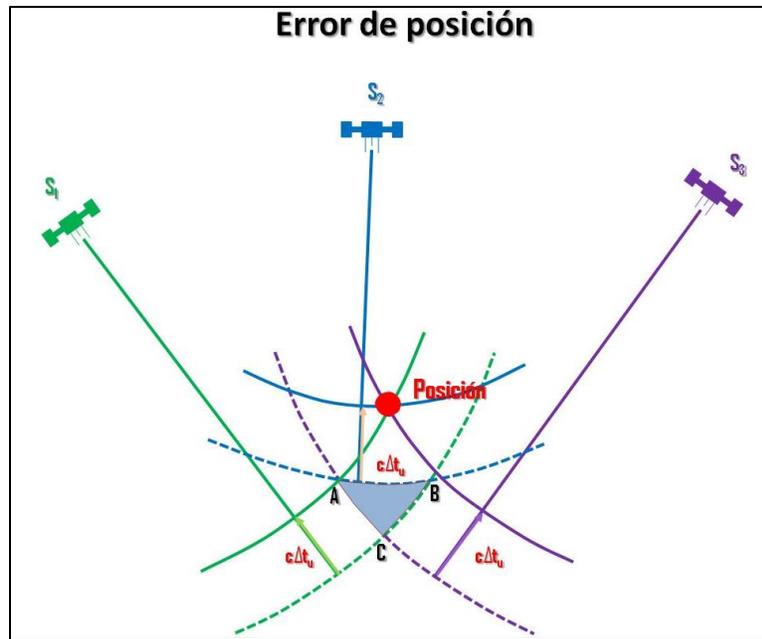


Fig. N° 7 “Corrección por error de recepción de la hora”.

Conociendo la distancia, desde el satélite al receptor; la posición espacial de cada satélite, es posible determinar geoméricamente la posición del receptor, ya que cada satélite es el centro de una esfera con centro en un punto conocido y de radio calculado. Ver Figura N° 8.

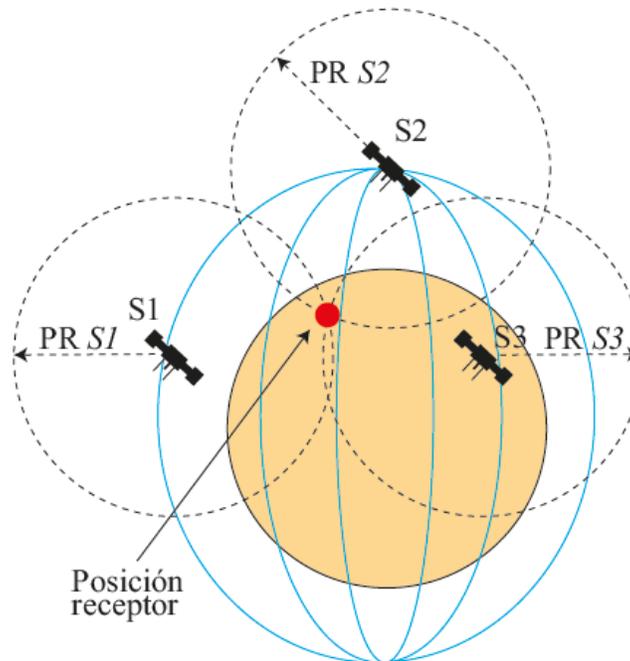


Figura N° 8 “La tierra, los tres satélites y posiciones conocidas y el corte del lugar geométrico de las esferas, proporciona la posición del buque”

F.- Exactitud

En relación a la actual exactitud del GPS, considerando un buen receptor, puede alcanzar una precisión horizontal de 3 metros o mejor y una precisión vertical de 5 metros o mejor el 95% del tiempo.

La precisión de la señal GPS en el espacio es en realidad la misma tanto para el servicio civil de GPS (SPS) como para el servicio militar de GPS (PPS). Sin embargo, SPS transmite en una frecuencia ($L1 = 1.575,42$ Mhz), mientras que PPS usa dos ($L1 = 1.575,42$ Mhz y $L2 = 1.227,60$ Mhz). Esto significa que los usuarios militares pueden realizar la corrección ionosférica, una técnica que reduce el error causada por la atmósfera de la Tierra. Con menos error, el PPS proporciona una mayor precisión que el SPS básico.

El futuro del GPS es alentador, el programa de modernización de los EE. UU. Es continuo, se están realizando muchos esfuerzos para actualizar el segmento espacial del GPS y los segmentos de control con nuevas características para mejorar su rendimiento (Fig. 3).

G.- Lo actual y futuro del GPS

La modernización está introduciendo tecnologías modernas en los segmentos espacial y control objeto mejorar el rendimiento general. Las computadoras y sistemas de comunicaciones actualmente en uso están siendo reemplazados por una arquitectura centrada en la red para permitir comandos satelitales más frecuentes y precisos que mejorarán la precisión.

El programa de modernización de GPS incluye una serie de adquisiciones satelitales consecutivas, que incluyen los satélites de recambio tales como GPS IIR (M), GPS IIF y GPS III. También implica mejoras en el segmento de control de GPS, incluido el Plan de evolución de la arquitectura (AEP) y el Sistema de control operacional de próxima generación (OCX).

La programación de las actualizaciones en paralelo del segmento de control y espacial se están viendo reflejado en la actualidad.

Todos los dispositivos móviles pueden integrar GPS de manera muy rentable y económica. Los teléfonos celulares son los usuarios más importante

A medida que los operadores desplieguen servicios y brinden información basada en la ubicación, se abrirá un nuevo segmento importante, tales como:

- Rastrear los perdidos.
- Calcular cuestiones relacionadas con los impuestos
- Utilizar en automóviles y calculará cuántas millas se viajaron y cuándo se puede obtener combustible
- Cobrar impuestos a esa persona por millas conducidas.
- Rastrear y hacer un mapa de sus recorridos en bicicleta, carreras y otras actividades al aire libre, incluida la distancia recorrida, la velocidad promedio, las calorías quemadas, etc.
- Mapear automáticamente a través de GPS y cargarla en una computadora.
- Determinar la carrera o el recorrido efectuado en determinado tiempo.

Con los recambios de los satélites ya obsoletos, el sistema proporcionará una mayor precisión de navegación, proporcionar una señal fácil de rastrear incorporando una segunda señal redundante en caso de interferencia.

El efecto inmediato de tener dos frecuencias civiles que se transmiten desde un satélite es la capacidad de medir directamente, y por lo tanto eliminar, el error de retardo ionosférico para ese satélite. Sin una medición de este tipo, un receptor GPS

debe usar un modelo genérico o recibir correcciones ionosféricas de otra fuente (como un sistema de aumento basado en satélites).

Los avances tecnológicos tanto para los satélites GPS como para los receptores GPS han hecho del retardo ionosférico la mayor fuente de error en la señal.

La idea del futuro es minimizar al máximo los errores y aumentar la precisión del GPS.

Con los recambios satelitales y las nuevas tecnologías se esta incorporando una capacidad para contribuir a la seguridad de Vida (Safety of Life). Es una señal de uso civil que se emite en la frecuencia L5 (1176.45 MHz). En 2009, un satélite WAAS envió las transmisiones iniciales de prueba de señal L5. SVN-62, el primer satélite del bloque GPS IIF, transmite continuamente la señal L5 a partir del 28 de junio de 2010.

La señal L5 se considerará completamente operativa una vez que al menos 24 satélites estén transmitiendo la señal, actualmente se proyecta que suceda en 2024. El año 2017, se emitía L5 desde 12 satélites.

Las Mejora son las siguientes

- Mayor potencia de transmisión que la señal L1 y L2 (dos veces más potente)
- Ancho de banda más amplio, lo que produce una ganancia de procesamiento 10 veces mayor
- Códigos de propagación más largos (10 veces más que los utilizados en el código normal)
- Ubicado en la banda de servicios de radionavegación aeronáutica, una banda de frecuencia disponible en todo el mundo.

H.- GPS en el Pilotaje

El GPS constituye uno de los equipos más importantes del puente de un buque, ya que le entrega al oficial de guardia la posición en tiempo real con una precisión de unos pocos metros. El mismo equipo, empleando el tiempo y las sucesivas posiciones puede determinar por ejemplo:

- Rumbo efectivo o rumbo respecto al fondo (COG)
- Abatimiento (COG – Rumbo giro)
- Velocidad respecto al fondo o velocidad efectiva (SOG)
- Establecer una ruta de navegación empleando puntos de control (waypoints), considerando el tiempo de llegada en función de la velocidad.
- Permite marcar la posición de un Hombre al Agua (MOB), e indica la demarcación y distancia a este.
- Es uno de los instrumentos más importantes del ECDIS.
- El radar lo emplea para determinar la posición de cualquier contacto, como asimismo el sistema
- ARPA calcula los datos cinemáticos de los contactos
- Componente importante del AIS.
- Permite calibrar la corredera.

Sin embargo, el navegante deberá tener mucho cuidado cuando se emplea el método de situación por GPS, el cual podría no brindar la exactitud requerida en

canales, pues este sistema, si bien proporciona situaciones muy exactas, éstas solo son de utilidad con cartas náuticas basadas en datum WGS 84 o equivalente, por lo que será inexacto y no recomendable su uso en canales y pasos, cuando la carta náutica está referida a datum distintos al requerido por los sistemas GPS, y las posiciones obtenidas no han sido corregidas.

Navegando con visibilidad reducida, como la niebla, chubasco o nieve, el empleo del GPS, junto a otros equipos, permite navegar con relativa seguridad y obtener situaciones bastante precisas.

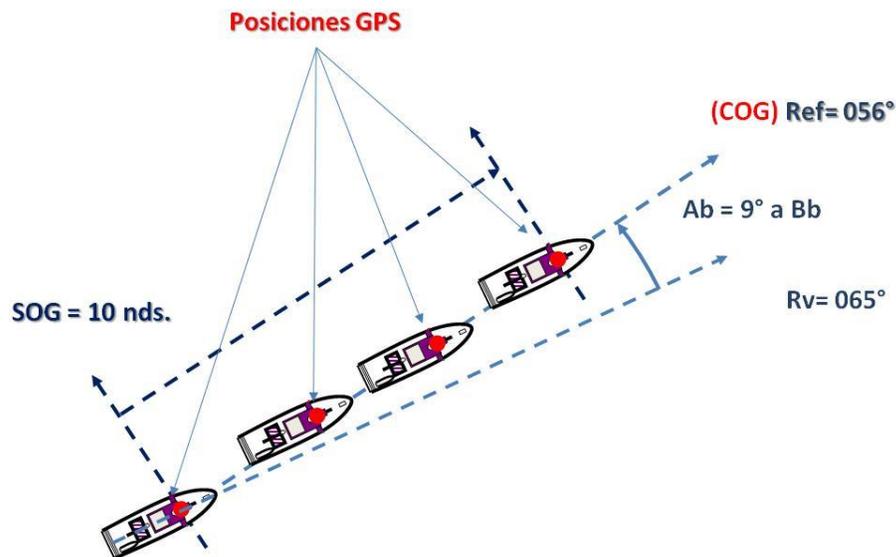


Figura N° 9: Cálculo del COG, SOG y abatimiento

I.- El concepto del GPS Diferencial (DGPS).

La precisión del GPS se podría ver degradada por la introducción intencional de un error aleatorio a los satélites por parte de EE.UU., con el propósito de negar la capacidad del sistema a usuarios que no dependan de su Departamento de Defensa.

Este error denominado Disponibilidad Selectiva – *Selective Availability* – (SA) puede ser obviado mediante el empleo de la técnica de posicionamiento diferencial; técnica que fue desarrollada especialmente para ello y para minimizar otros errores propios del sistema, tales como:

- Dilución de la precisión horizontal, que tiene que ver con los ángulos de corte de los arcos de distancia desde los satélites.
- Multitrayectoria de las señales transmitidas desde los satélites, lo que resulta en un error en la medida de la distancia.
- Instalación de la antena receptora.
- Resolución y estabilidad de las frecuencias en uso.
- Refracción atmosférica, efecto que se resuelve al emplear dos frecuencias.

Técnica del DGPS

Consiste en la medición continua de coordenadas GPS en una estación, cuyas coordenadas son conocidas en un alto orden geodésico de exactitud, lo que permite comparar las coordenadas obtenidas desde los satélites en un instante “t” con las coordenadas exactas del lugar.

La diferencia entre unas y otras constituye el error en posicionamiento en un instante “t”. Este error es transmitido radialmente por la estación correctora en una frecuencia de MF, que fluctúa en el rango de 283 a 325 kHz. Cada estación correctora es asignada a una frecuencia característica, lo que permite a los receptores identificar desde cual estación están recibiendo la corrección diferencial.

La corrección recibida en el móvil es aplicada a las coordenadas computadas por el receptor GPS de a bordo, que han sido afectadas por el mismo error sistemático que la estación correctora, ya que ambas emplearon los mismos satélites para la determinación de su posición. De paso, los errores de posicionamiento propios del sistema, quedan también corregidos. De esta forma, es posible obtener precisiones a bordo de menos de 5 metros, lo que para navegación marítima representa exactitudes imposibles de obtener de otra forma; agregándose a ello que esta prestación es continua.

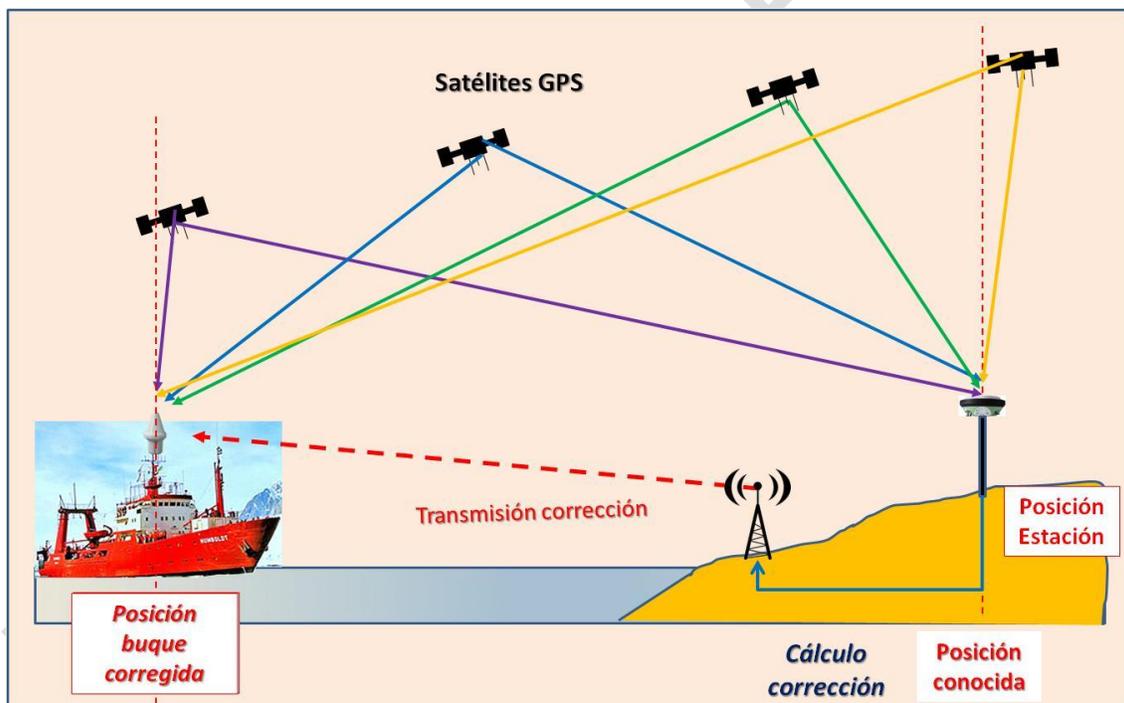


Fig.: N° 10 “Esquema del GPS diferencial”

DGPS está compuesta por las estaciones de corrección y por un número menor de estaciones de control, que monitorean a un grupo de estaciones correctoras de una región. Las estaciones de control verifican el funcionamiento integral del sistema, lo que permite generar acciones correctivas remotas o de ser necesario, desplazar personal técnico a las estaciones correctoras que presentan un funcionamiento defectuoso.

Aun cuando las estaciones de corrección están siendo monitoreadas desde las estaciones de control, están diseñadas para otorgar una alta confiabilidad, lo que se logra sobre la base de redundancia en la cantidad de equipos receptores GPS.

Típicamente, una estación correctora cuenta con dos receptores GPS de referencia y dos receptores de GPS para monitoreo de la integridad del sistema. Estos últimos emulan a un usuario que recibe la señal de corrección transmitida desde su propia estación, comparando la solución otorgada por el sistema de posicionamiento DGPS con su posición que, al igual que los receptores de referencia, es conocida en un alto orden geodésico de exactitud, realimentando al sistema con las diferencias encontradas; datos que son empleados por el software de monitoreo y control de cada estación, para perfeccionar el dato de corrección que está siendo transmitido.

Para transmitir la corrección diferencial, en cada estación se conecta al sistema de posicionamiento un transmisor MF, de una potencia mínima de 100 W. Dependiendo del patrón de propagación radial de cada estación en particular y para asegurar una adecuada cobertura de la señal de corrección, hasta traslapar con las áreas de cobertura de las estaciones adyacentes, será necesario contar con transmisores de mayor potencia; siendo frecuente el empleo de equipos con una potencia de transmisión.

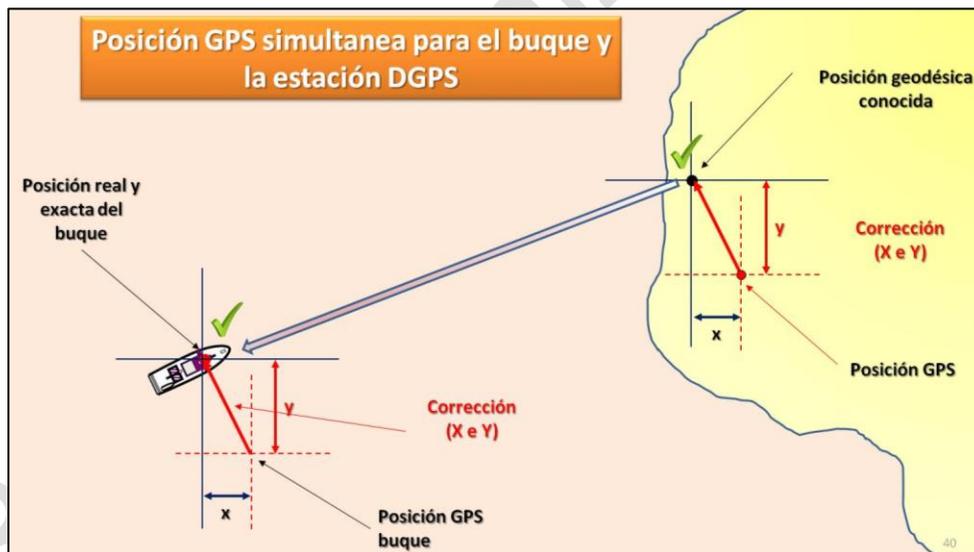


Fig.: N° 11 "Corrección simultánea del GPS diferencial"

J.- SBAS

SBAS, Sistema de Aumentación Basado en Satélites, (Satellite Based Augmentation System), es un sistema de corrección de las señales que los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) transmiten al receptor GPS del usuario. Los sistemas SBAS mejoran el posicionamiento horizontal y vertical del receptor y dan información sobre la calidad de las señales.

Actualmente están desarrollados o en fase de implementación los siguientes sistemas SBAS:

- **WAAS** (Wide Area Augmentation System), gestionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
- **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service), administrado por la Agencia Espacial Europea.
- **WAGE** (Wide Area GPS Enhancement), que trasmite más precisión en los datos de efemérides y reloj de los satélites destinado a uso militar.
- **MSAS** (Multi-Functional Satellite Augmentation System), operado por Japón.
- StarFire, gestionado por la empresa John Deere.
- **QZSS** (Quasi-Zenith Satellite System), propuesto por Japón.
- **GAGAN** (GPS and GEO Augmented Navigation), planeado por la India.

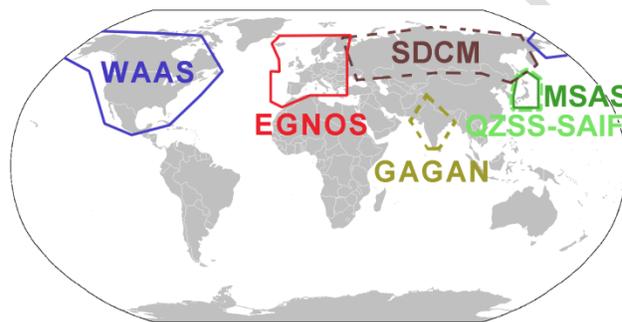


Fig. N° 12 "Áreas de cobertura de los Sistema de Aumentación Basado en Satélites"

Funcionamiento

Está conformada por una red de estaciones terrestres de referencia distribuidas por una amplia zona geográfica (países o continentes enteros) que supervisan las constelaciones de satélites de GNSS. Estas estaciones retransmiten los datos a una instalación de procesamiento central que evalúa la validez de las señales y calcula correcciones a los datos de efemérides y reloj radiodifundidos de cada satélite a la vista.

Para cada satélite GPS o GLONASS controlado, el SBAS estima los errores en los parámetros, y a su vez estas correcciones son transmitidas a la estación receptora por medio de satélites geoestacionarios. Luego el receptor de a bordo ajusta la información recibida directamente de los satélites GPS con las correcciones recibidas de los **satélites geoestacionarios**, para así navegar con más precisión.

Los mensajes de integridad y correcciones para cada fuente telemétrica GPS o GLONASS vigilada se transmiten en la frecuencia GPS L1 de los satélites geoestacionarios SBAS, situados en puntos orbitales fijos sobre el ecuador terrestre. Los mensajes SBAS aseguran la integridad, mejoran la disponibilidad y proporcionan la actuación necesaria para aproximaciones con guiado vertical APV, y en un futuro, a CAT I.

El SBAS utiliza mediciones de distancia en dos frecuencias para calcular el retardo de la medición de distancia introducido por la ionosfera y radiodifunde las

correcciones aplicables en puntos de la cuadrícula ionosférica (grid points) predeterminados. El receptor SBAS del usuario interpola entre los puntos de la cuadrícula para calcular la corrección ionosférica a lo largo de su línea de alcance óptico a cada satélite.

Además de correcciones de reloj, efemérides e ionosféricas, el SBAS evalúa y transmite parámetros que limitan la incertidumbre en las correcciones. Combinando estos cálculos de incertidumbre en las correcciones con cálculos de las incertidumbres en su propia exactitud de mediciones de pseudodistancia, el receptor SBAS de usuario modeliza un error para su solución de navegación propia.

Es importante distinguir entre las zonas de cobertura y las zonas de servicio SBAS. La zona de cobertura se define por las huellas en tierra (footprints) de las señales de los satélites geoestacionarios. Las zonas de servicio para un SBAS determinado se establecen por el estado dentro de la zona de cobertura SBAS. El estado es el responsable de designar los tipos de operaciones que pueden apoyarse dentro de una zona de servicio determinada.

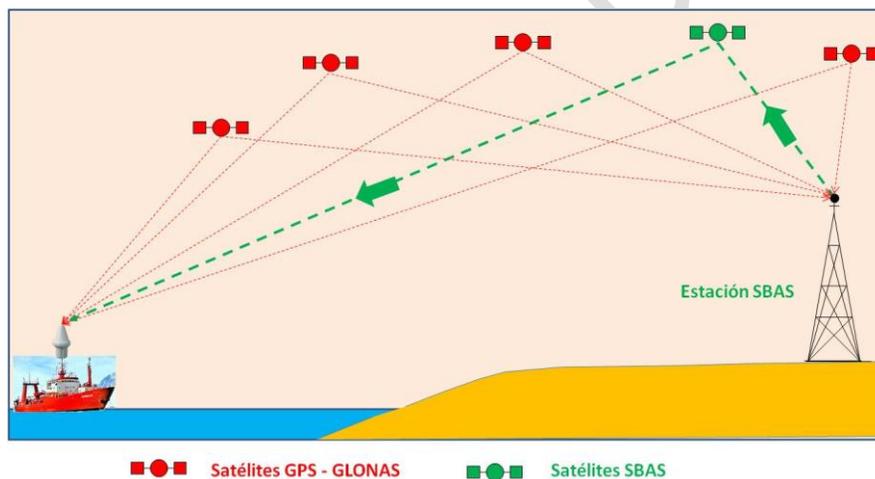


Fig. N° 12 "Esquema de funcionamiento de SBAS."

Virtudes del sistema

Entre las ventajas del SBAS se encuentran:

- **Provee una guía tridimensional para aproximaciones de precisión a las aeronaves dentro del área de servicio.** Este método de operación del SBAS mejora significativamente los instrumentos bidimensionales de navegación existentes que no pueden proveer referencias verticales precisas a los pilotos.
- **Provee gran precisión** (hasta 5 m vertical y hasta 2 m horizontal) y disponibilidad (radiodifunde señales similares al GPS por varios satélites geoestacionarios) para aproximaciones de Categoría I, además de integridad (alto nivel de redundancia en el sistema y notificación de fallos en 6 s) para la seguridad del sistema GPS y apoyo a las operaciones de vuelo.
- **Reduce las posibilidades de accidentes** contra tierra durante vuelos controlados y aproximaciones.

R. Léniz D. (2020)

- **Elimina los costes asociados en el mantenimiento** de los instrumentos de navegación más antiguos con base terrestre tal como los NDB, VOR, DME y los ILS para la Categoría I.
- **Reduce el número de piezas de equipos a bordo** de la aeronave y requerirá sólo un pequeño receptor montado en la cabina y una antena.
- Permite reducir los estándares que gobiernan la separación entre aeronaves en vuelo, permitiendo alojar un mayor número de ellas en un espacio dado, sin aumentar los riesgos.

K.- Otros Sistemas de Navegación por Satélite

1.- El Sistema GLONASS

El Sistema Global de Navegación Satelital (GLONASS), bajo el control militar de Rusia, que se basa en los mismos principios que el GPS, ha estado en servicio desde 1993.

El segmento espacial consiste de una constelación de 24 satélites en tres planos orbitales, los planos separados 120° y los satélites individualmente por 45° .

Las órbitas están inclinadas con respecto al ecuador en un ángulo de $64,8^\circ$, y el período orbital es alrededor de 11 horas 15 minutos, a una altura de 19.100 km.

El sistema asigna una precisión para el uso civil de 100 metros (95%) horizontalmente y 150 metros verticales. El uso de los códigos militares entrega una exactitud de 10 a 20 metros horizontales.

El segmento de control terrestre de GLONASS se encuentra completamente dentro de lo que fue la ex Unión Soviética. Su confiabilidad ha sido el principal problema para el sistema GLONASS, pero nuevos diseños de satélites con períodos de vida más prolongada, están superando estas preocupaciones.

El segmento del usuario consiste en varios tipos de receptores, los que entregan información sobre posición, hora y velocidad.

La posición entregada por los receptores GLONASS está referida al sistema de coordenadas SGS-85, por lo que debe ser transformada al dátum de referencia de la carta en uso por el navegante, para obtener su posición sobre la carta.

El estado actual de GLONASS, todavía no es capaz de prestar una adecuada capacidad operacional que permita reemplazar al GPS.

2.- El Sistema Galileo

El sistema de navegación Galileo es un proyecto común de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Unión Europea que surgió como una alternativa necesaria al sistema estadounidense GPS.

Galileo es el primer sistema de navegación por satélite implementado y dedicado para uso civil. Se compone de una constelación de 30 satélites, que se mueven alrededor de la Tierra a una distancia de 24.000 kilómetros.

En diciembre de 2005, desde el cosmodromo de Baikonur, en Kasajtán, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó el satélite Giove-A, el primero del sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea con participación china, para así evitar la dependencia de los sistemas GPS y GLONASS.

El lanzamiento de Giove B, del segundo satélite del sistema Galileo, fue en abril de 2008. En esa fase, la agencia ESA realizó las pruebas necesarias con las llamadas tecnologías críticas, necesarias para el funcionamiento del sistema.

Los satélites cuentan con dos relojes atómicos de rubidio, que con una estabilidad, son los de mayor precisión jamás lanzada al espacio.

Los satélites definitivos contarán con cuatro relojes de este tipo, para garantizar su operatividad. La exactitud de la medición del tiempo es crucial para el funcionamiento del Galileo, ya que la localización de un punto emisor en la tierra se basa, en parte, en la medición del tiempo que tarda la señal en llegar al conjunto de satélites.

El horizonte más optimista de la ESA, sitúa el año 2014 como la fecha en la que la constelación de satélites estará completa y plenamente operativa.

Este sistema europeo de navegación por satélite, permitirá notables mejoras en los servicios de rescate y de ayuda en accidentes; como asimismo, en aspectos tan variados como el medio ambiente, la ingeniería civil, la agricultura y la pesca, el mundo de las finanzas, la aviación, las telecomunicaciones, el transporte público, la protección civil y la energía.

3.- Sistema BeiDou

Desarrollado por la República Popular de China. "Beidou" es el nombre chino para la constelación de la Osa Mayor.

La primera generación, inicio su operación el 2000 y es un sistema de posicionamiento por satélite local dando servicio a China y a sus países vecinos. Actualmente todos están fuera de servicio.

La segunda generación, llamada BeiDou-2, es un sistema de posicionamiento global con un funcionamiento similar al GPS. El primer satélite fue lanzado el año 2007.

La tercera Generación, llamada BeiDou-3, inicia la construcción el año 2015, cuyo objetivo es la cobertura global. El primer satélite BDS-3 se lanzó el 30 de marzo de 2015, a partir de octubre de 2018, se lanzaron quince satélites BDS-3. BeiDou-3 eventualmente tendrá 35 satélites y se espera que brinde servicios globales una vez que finalice en 2020.

Cuando se complete, BeiDou proporcionará un sistema alternativo de navegación por satélite global al GPS, GLONASS y Galileo y se espera que sea

más precisos que estos. Se afirma que en 2016 que BeiDou-3 alcanzará una precisión milimétrica (con posprocesamiento).

4.- Sistema Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)

En 2002, el gobierno japonés autorizó el desarrollo de QZSS, como un sistema de transferencia de tiempo regional de cuatro satélites y un sistema de aumentación basado en satélites de los Estados Unidos opera el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para ser recibido dentro de Japón.

El primer satélite "michibiki" fue lanzado el 11 de septiembre de 2010. Se esperaba que el estado operativo completo para el año 2013, el cuarto se lanzó en octubre de 2017. Está previsto que el sistema básico de cuatro satélites esté operativo en 2018.



Fig. N° 14 "Orbita de los satélites del sistema QZSS".

QZSS usa tres satélites, en órbitas geosincrónicas muy inclinadas, ligeramente elípticas. Cada órbita es de 120° . Nunca se encuentran en el mismo lugar en el cielo. en la figura 14 se muestran las órbitas, diseñadas para garantizar que un satélite se encuentre por encima (elevación de 60° o más) sobre Japón en todo momento.

Una función secundaria es mejorar el rendimiento del GPS, lo que aumenta la precisión y la fiabilidad de las soluciones de navegación derivadas de GPS. Las modificaciones que se le deben hacer al receptor GPS serán mínimas.

En los Juegos Olímpicos de Tokio 2020 darán un impulso adicional a las soluciones precisas de posicionamiento y cronometraje.

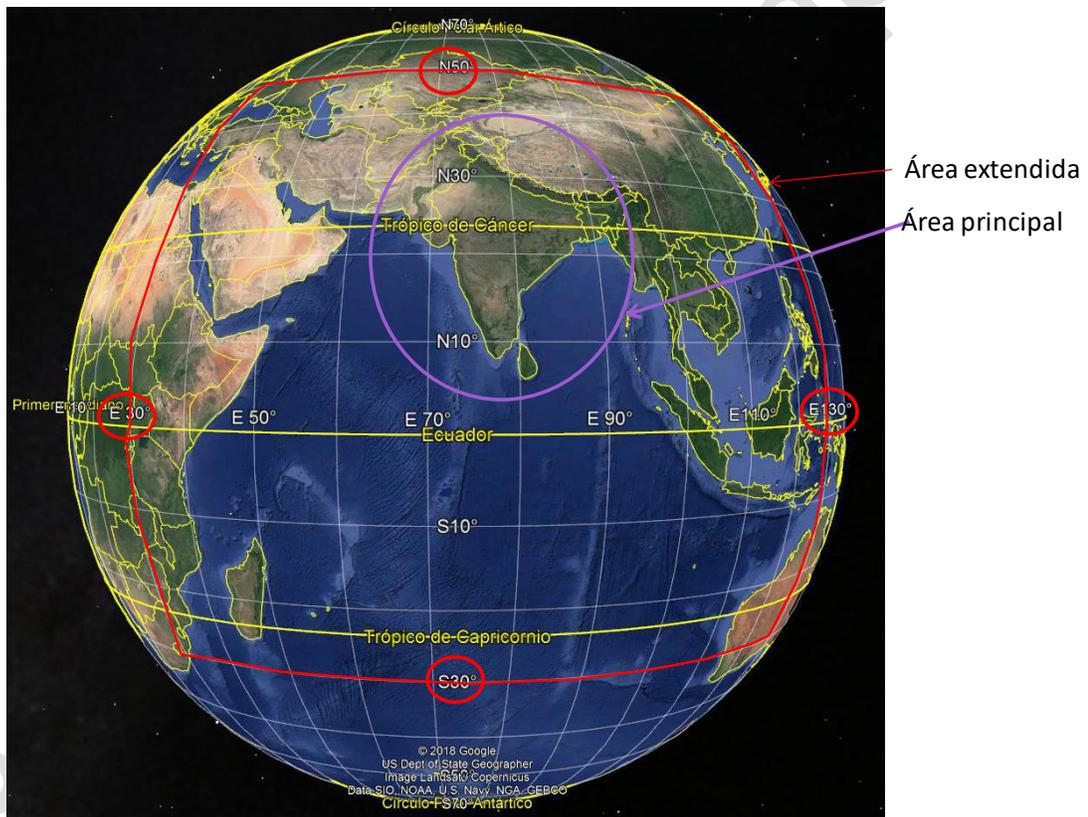
El GNSS (global navigation satellite system) analiza el sistema QZSS en evolución de Japón y los muchos beneficios que se espera que traiga.

5.- IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System)

IRNSS es un sistema regional independiente de navegación por satélite que India está desarrollando. Está diseñado para proporcionar un servicio de información de posición precisa a los usuarios en la India, así como a la región que se extiende hasta 1500 km desde su límite, que es su área de servicio principal.

Un área de servicio extendido se encuentra entre el área de servicio principal y el área encerrada por el rectángulo desde la latitud 30° S hasta los 50° N, la longitud 30° E hasta los 130° E.

IRNSS proporcionará el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) y el Servicio Restringido (RS), que es un servicio cifrado solo a los usuarios autorizados. Se espera que el sistema IRNSS proporcione una precisión de posición superior a 20 m en el área de servicio principal.



Algunas aplicaciones de IRNSS son:

- Navegación terrestre, aérea y marítima.
- Gestión de desastres
- Seguimiento de vehículos y gestión de flotas.
- Integración con teléfonos móviles.
- Sincronización precisa
- Mapeo y captura de datos geodésicos.
- Ayuda a la navegación terrestre para excursionistas y viajeros.
- Navegación visual y de voz para conductores.

Hasta la fecha, ISRO ha construido un total de nueve satélites en la serie IRNSS; de los cuales ocho están actualmente en órbita. Tres de estos satélites están en órbita geoestacionaria² (GEO), mientras que los restantes en órbitas geosíncrona³ (OSG) mantienen una inclinación de 29 ° con respecto al plano ecuatorial.

El último satélite en entrar en operación fue lanzado en abril de 2018.

² Una **órbita geoestacionaria** o **GEO**, es un tipo particular de órbita **geosíncrona** u órbita geosíncrona: es una órbita en el plano ecuatorial terrestre, con una excentricidad nula (órbita circular) y un movimiento de Oeste a Este. Es una órbita circular a 35.786 kilómetros de distancia de la superficie de la Tierra (a 42.164 km del centro de la Tierra), sobre el ecuador, y orbitando en el mismo sentido que la rotación de la Tierra.

³ Una **órbita geosíncrona** es una órbita geocéntrica que tiene el mismo período orbital que el período de rotación intrínseca local de la Tierra. Tiene un semieje mayor de 42 164 km en el plano ecuatorial.