

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



# **Sistema didáctico de posicionamiento global aplicado a la navegación aérea.**

PRESENTADO POR:

**JONATHAN IVAN MOLINA AREVALO**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2012.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA**

**DIRECTOR :**

**ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA.**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**Sistema didáctico de posicionamiento global  
aplicado a la navegación aérea**

Presentado por :

**JONATHAN IVAN MOLINA AREVALO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. CARLOS EUGENIO MARTÍNEZ CRUZ**

San Salvador, Septiembre de 2012.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. CARLOS EUGENIO MARTÍNEZ CRUZ**

# TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCION

JUSTIFICACION

OBJETIVOS

GLOSARIO DE TERMINOS.

## 1. SISTEMAS DE NAVEGACION ACTUALES.

1.1 INTRUDUCCION.	1
1.2 SISTEMAS DE NAVEGACION ACTUALES.	2
1.3 SISTEMAS DE NAVEGACION BASADOS EN POSICIONAMIENTO GLOBAL.	9

## 2. SISTEMAS DE NAVEGACION DEL FUTURO.

2.1 DEFINICION, COMPOSICION Y CARACTERISTICAS DE GNSS.	15
2.1.1 SEGMENTO ESPACIAL.	16
2.1.2 SEGMENTO DE CONTROL.	17
2.1.3 SEGMENTO DE USUARIO.	17
2.1.4 SISTEMAS DE AUMENTACION GNSS.	18
2.1.4.1 SISTEMAS DE AUMENTO BASADOS EN AERONAVE: ABAS.	19
2.1.4.2 SISTEMAS DE AUMENTO BASADOS EN TIERRA: GBAS.	20
2.1.4.3 SISTEMAS DE AUMENTO BASADOS EN SATELITES: SBAS.	20
2.2 SISTEMAS DE NAVEGACION POR SATELITES.	23
2.2.1 SISTEMA GLOBAL DE POSICIONAMIENTO GPS.	23
2.2.1.1 SEGMENTO ESPACIAL.	23
2.2.1.2 SEGMENTO DE CONTROL.	25
2.2.1.3 SERVICIOS GPS.	26
2.2.2 GLOBAL NAVIGATION SATELITE SYSTEM GLONASS.	
2.2.2.1 SEGMENTO ESPACIAL.	26
2.2.2.2 SEGMENTO DE CONTROL.	28
2.2.2.3 SERVICIO GLONASS.	28
2.2.3 SISTEMA EUROPEO DE NAVEGACION GALILEO.	
2.2.3.1 SEGMENTO ESPACIAL.	29
2.2.3.2 SEGMENTO DE CONTROL.	30

2.2.3.3	SERVICIOS GALILEO.	31
2.3	REQUERIMIENTOS DE NAVEGACION SATELITAL.	
2.3.1	NORMATIVA UIT.	32
2.3.2	GPS.	
2.3.2.1	DEFINICION DE LA INTERFAZ.	33
2.3.2.2	ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN.	34
2.3.2.3	ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION.	35
2.3.2.4	ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION.	36
2.3.3	GLONASS.	
2.3.3.1	DEFINICION DE LA INTERFAZ.	38
2.3.3.2	ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN.	38
2.3.3.3	ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION.	39
2.3.3.4	ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION.	41
2.3.4	GALILEO.	
2.3.4.1	DEFINICION DE LA INTERFAZ.	42
2.3.4.2	ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN.	42
2.3.4.3	ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION.	43
2.3.4.4	ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION.	45
<b>3.</b>	<b>MATEMATICA DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATELITE.</b>	
3.1	MATEMATICA DE LSO SATELITES.	48
3.2	EJEMPLO DE CALCULO DE POSICION.	52
<b>4.</b>	<b>SIMULACION.</b>	
4.1	INTRODUCCION A LA SIMULACION.	57
4.2	SIMULACION.	57
4.3	ANALISIS DE RESULTADOS.	67
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	
5.1	CONCLUSIONES.	74
5.2	RECOMENDACIONES.	75
	ANEXO.	77
	APENDICES.	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	103

## INTRODUCCION.

Los sistemas de navegación aérea han evolucionado con el paso de los años gracias a las nuevas tecnologías que se desarrollan día tras día. El campo de la navegación aérea no es excluido de las aplicaciones que han mejorado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías.

El primer método de navegación aérea utilizado era el de utilizar referencias visuales ubicadas sobre la superficie de la tierra. Por medio del seguimiento de este tipo de referencias ubicadas sobre un mapa, era posible realizar el transporte de un avión de un punto a otro. Luego la aplicación de sistemas inerciales a bordo de la aeronave como lo es la brújula y sistemas de soporte de comunicación vía radio. El mayor método utilizado en la actualidad es la radionavegación aérea, el cual consiste en navegar sobre áreas donde existe una cobertura de una estación de radio en tierra a lo largo de una trayectoria. Estas estaciones transmiten señales que los equipos de electrónica de abordaje transforman en información legible a los pilotos para poder realizar la navegación aérea. El próximo paso de la navegación es la que se basa en la comunicación de los satélites con estaciones en tierra y también de forma directa con las aeronaves.

GNSS (del inglés *Global Navigation Satellite System*), es el acrónimo que se refiere al conjunto de tecnologías de sistemas de navegación por satélite que proveen de posicionamiento geoespacial con cobertura global de manera autónoma. Los orígenes del GNSS se sitúan en los años 70 con el desarrollo del sistema militar estadounidense GPS (*Global Positioning System*), destinado al guiado de misiles, localización de objetivos y tropas etc. A través de una red de satélites, un receptor de GNSS es capaz de determinar su posición en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altitud, y tiempo), lo que ha dado lugar a multitud de aplicaciones civiles y militares.

En este trabajo se estudia los diferentes sistemas y dispositivos utilizados en la actualidad para llevar a cabo la navegación aérea. Se presentarán también los distintos sistemas existentes en la actualidad y futuro de navegación GNSS. Se estudia los diferentes componentes básicos de un GNSS y la forma en que las diferentes redes de satélites están divididas en el espacio.

Luego es realizado un análisis matemático de cómo es llevado a cabo el posicionamiento de un receptor sobre o por encima de la superficie de la tierra por medio de señales manejadas entre satélites y estaciones en tierra. La parte final de este trabajo muestra una simulación cuyos resultados pretenden afirmar afirmaciones de escenarios de navegación que los sistemas GNSS ofrecen. Esto se lleva a cabo por medio de la creación de rutas de navegación reales sobre la superficie de la tierra y que son usadas por empresas destinadas al transporte aéreo comercial en América.

## **JUSTIFICACION.**

A PARTIR DE EL AÑO 2008 LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA AMPLIO su oferta de asignaturas e incluyo una perteneciente al campo que hasta la fecha estaba ignorado: el sector aeronáutico. Esa decisión llevo a incluir en la oferta de asignaturas la materia de Sistemas de Radionavegación Aérea. Al mismo tiempo, se empiezan a realizar trabajos de graduación que investigan muchos conceptos desconocidos hasta la fecha en la currícula de ingeniería eléctrica.

En el curso de Sistemas de Radionavegación Aérea se estudian las diferentes facilidades utilizadas en la actualidad para llevar a cabo la navegación y el estudio de los fenómenos radioeléctricos involucrados en este tipo de navegación utilizada en la actualidad.

En este trabajo de graduación se propone una extensa investigación bibliográfica sobre los sistemas de ayuda basados en sistemas de posicionamiento global. Además de la simulación por computadora que permita ilustrar la manera en como trabajan estos nuevos sistemas.

## **OBJETIVOS.**

### **OBJETIVO GENERAL.**

- Realizar una investigación bibliográfica sobre los sistemas de ayuda a la navegación aérea basados en posicionamiento global; y realizar simulaciones orbitales que ilustren la localización de aeronaves en movimiento.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Realizar una revisión bibliográfica de los sistemas actuales de navegación aérea.
- Realizar una revisión bibliográfica de los sistemas de navegación basados en posicionamiento global.
- Comprender el proceso matemático que es utilizado por los receptores de señales de posicionamiento global por medio de un estudio de la matemática orbital de posicionamiento global.
- Desarrollar una simulación de seguimiento de aeronaves basados en posicionamiento global.

## **GLOSARIO TECNICO**

AAC. Autoridad de Aviación Civil.

ABAS. Sistema de Aumentación Basado en Aeronaves (Aircraft Based Augmentation System).

ADF. Buscador Automático de Dirección (Automatic Direction Finder).

AGI. (Analytical Graphics Inc).

ATC. Control de Transito Aereo (Air Traffic Control).

CEPA. Comité Ejecutivo de Puertos y Aeropuertos.

COCESNA. Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea.

DGPS. GPS Diferencial (Differential GPS).

DoD. Departamento de Defensa (Department of Defense).

EGNOS. European Geostationary Navigation Overlay Service.

FAA. Federal Aviation Administration.

GBAS. Sistema de Aumentación Basado en Tierra (Ground Based Augmentation System).

GNSS. Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System).

GPS. Sistema de Posicionamiento global (Global Positioning System).

HF. Alta Frecuencia (High Frequency).

Hz. Hertz.

ICD. Documento de Control de Interfaz (Interface Control Document).

ILS. Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (Instrument Landing System).

DGAC. Dirección general de Aviación Civil.

DME. Equipo Medidor de Distancia (Distance Measurement Equipment).

FIR. Región de Información de Vuelo (Flight Information Region).

MFSAS. Multi-functional Satellite Augmentation System.

MHz. Mega Hertz.

NDB. Radiofaro no Direccional (Non Directional Beacon).

NM. Millas Nauticas (nautique Miles).

OACI. Organización de Aviación Civil Internacioneal.

ONU. Organización de las Naciones Unidas.

PRN. Pseudocódigo (Pseudorange Noise).

PSR. Radar de Vigilancia Primario (Primary Surveillance Radar).

SBAS. Sistema de Aumentación Basado en Satélites (Satellite Based Augmentation System).

SSR. Radar de Vigilancia Secundario (Secondary Surveillance Radar).

UHF. Ultra High Frequency.

VHF. Very High Frequency.

VOR. VHF Omnidirectional Range.

WASS. Wide Area Augmentation System.

# **CAPITULO 1. SISTEMAS DE NAVEGACION ACTUALES.**

## **1.1 INTRODUCCION.**

La aviación comercial se ha convertido con el transcurso de los años en uno de los medios de transporte más seguros del mundo. La evolución que este medio de transporte ha presentado durante su historia, muestra la contribución del desarrollo tecnológico hacia esta área. A medida se implementan nuevas tecnologías, la seguridad de las operaciones aeronáuticas aumenta de igual manera.

La implementación de nuevas tecnologías en todas las áreas de la aviación civil, es uno de los objetivos primordiales perseguidos por todas las empresas involucradas en el mercado aeronáutico. Mundialmente, la organización encargada de que se cumpla dicho objetivo es la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) que es una agencia de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). La OACI fue creada para estudiar los problemas de la aviación civil internacional [1].

Además, la OACI es responsable de promover los reglamentos y las normas en el sector aeronáutico mundial. Cada país en el mundo es responsable de administrar la explotación de la aviación civil. Para ello debe existir un ente regulador de cada uno de los procedimientos operacionales que las compañías aéreas que desean operar en ese país deben de cumplir.

En El Salvador, esta organización se llama Autoridad de Aviación Civil (AAC). Durante 1994 – 2001 fue conocida como Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y pertenecía al Ministerio de Economía de El Salvador [2]. A partir de Octubre de 2001, la Asamblea Legislativa la reconoció como institución autónoma, denominándola Autoridad de Aviación Civil. La misión específica de la AAC en El Salvador es fomentar el desarrollo de la Aviación Civil en El Salvador mediante la implementación de prácticas seguras, a través del establecimiento de normativas esenciales, fundamentadas en estándares internacionales, y de la certificación y vigilancia de operadores y personal técnico aeronáutico para garantizar la seguridad operacional.

Uno de los objetivos más importantes que persigue cumplir la OACI es desarrollar los principios y la técnica de la navegación aérea internacional y fomentar la formulación de planes y el desarrollo del transporte aéreo internacional.

La AAC se encarga de regular toda actividad de los operadores aéreos en El Salvador, para cumplir los objetivos que la OACI persigue. La tarea de administrar recursos aeronáuticos tal y como lo es el Aeropuerto Internacional de El Salvador, es una tarea designada al Comité Ejecutivo de Puertos y Aeropuertos (CEPA) [3].

Otra tarea importante realizada por otras organizaciones, para llevar a cabo la actividad aeronáutica comercial, es la que tiene como fin la vigilancia de los vuelos y el monitoreo constante de estos en todas las regiones del mundo. A nivel global, el espacio aeronáutico está dividido en regiones de información de vuelo denominadas Regiones de Información de Vuelo (FIR, del inglés Flight Information Region) [4].

El área en la que El Salvador está incluida geográficamente es administrado por la Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea (COCESNA). Esta está formada por 6 estados miembros: Guatemala, Belize, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. COCESNA brinda todo tipo de servicios de navegación aérea, como por ejemplo control de tránsito aéreo, telecomunicaciones aeronáuticas, información aeronáutica y radioayuda a la navegación aérea [5].

## **1.2 SISTEMAS DE NAVEGACION ACTUALES.**

En la actualidad, la navegación aérea es mayormente realizada por sistemas denominados de Radionavegación. Estos sistemas están implementados en estaciones terrestres alrededor del mundo denominadas radioayudas, que son básicamente estaciones que transmiten frecuencias de radio con el fin de determinar la posición de las aeronaves en algún punto de la tierra [6].

El Salvador también cuenta con este tipo de estaciones, las cuales son esenciales para que la navegación aérea sea posible. Las radioayudas más importantes están ubicadas en el Aeropuerto Internacional de El Salvador y en el Aeropuerto de Ilopango.

Los principios básicos de navegación se realizan por medio de estaciones en tierra. Estas balizas hacen posible la medición de 2 parámetros por medio de diferentes fenómenos eléctricos:

- Dirección, por medio del desfase de señales de radio;
- Distancia, por medición de retardos de tiempos.

En la actualidad, las cartas de navegación Jeppessen son elemento esencial utilizado para el diseño de trayectorias de vuelo [7]. Estas son utilizadas para construir las rutas de navegación que deben de seguirse para conectar dos puntos sobre el mapa. Están formadas de aerovías que son básicamente una trayectoria entre dos puntos fijos que se encuentran situados en la superficie de la tierra. Los puntos fijos son estaciones fijas de radio terrestres que están diseñadas para proporcionar información de dirección y distancia, tanto dentro de la aeronave como en estaciones de vigilancia terrestres. Estos parámetros son esenciales para llevar a cabo la navegación aérea.



## El sistema VOR .

Se trata de una radioayuda a la navegación que utilizan las aeronaves para seguir en vuelo una ruta preestablecida. Generalmente se encuentra una estación terrestre VOR en cada aeropuerto. La antena VOR de la estación emite una señal de radiofrecuencia VHF en todas direcciones, que es recibida por el equipo VOR de cualquier aeronave que se encuentre dentro del rango de alcance (máx. unos 320 Km de distancia oblicua hasta 37,500 pies de altura sobre la estación) y tenga sintonizada la frecuencia de dicha estación (que puede variar de 111.975 a 117.975 MHz pero que también puede trabajar en la banda de 108.00 a 111.975 MHz modulada en AM) [8].

La operación de un equipo VOR de tierra esta basada en la diferencia de fase entre dos señales que emite: una señal de referencia o de fase fija y otra señal variable o de fase variable.

La señal de referencia es de 30Hz, es omnidireccional, es decir, se transmite desde la estación todas las direcciones, permaneciendo constante en todos los sentidos. Esta señal de referencia modula en frecuencia a una onda sub-portadora de 9,960 Hz., la cual modula a su vez en amplitud a la portadora. La señal variable, también de 30Hz. modula en amplitud a la onda portadora y se transmite a través de una antena direccional que gira a una velocidad de 1,800 rpm.

El VOR emite un numero infinito de haces que pueden verse desde la estación, como si fuera los radios de una rueda. Estos haces son conocidos como radiales y se identifican por su marcación magnética de salida de estación. Los radiales de un VOR son infinitos, pero el equipo de abordaje es capaz de diferenciar 360 de ellos. La Figura 2 muestra una estación de tipo VOR/DME.



Figura 2. Estación VOR/DME.

El Aeropuerto de El Salvador cuenta con una estación VOR/DME, similar a la mostrada en la Figura 2. La estación brinda el servicio de ambas radio ayudas. El código OACI de la estación es: CAT y esta sintonizada en los 117.5 MHz. También el Aeropuerto de Ilopango posee una estación VOR/DME cuyo código OACI es: YSV y opera en los 116.5 MHz.

El Aeropuerto de Ilopango no es un aeropuerto utilizado para vuelos de aerolíneas comerciales, debido a muchos factores como por ejemplo el estado de la pista, la longitud de la pista y las facilidades de las que el aeropuerto no dispone para brindar servicio, como lo son puentes de abordaje y equipos de cargas de equipaje.

Este es mayormente utilizado con fines militares, tanto como para escuelas de aviación civil que existen en El Salvador y prácticas militares que realiza la Fuerza Aérea de El Salvador.

### El sistema NDB.

Como su nombre lo indica, no emite una señal que incluya información inherente respecto de su dirección. Las señales transmitidas por un NDB siguen la curvatura de la tierra, de esta forma estas pueden ser recibidas distancias mucho mayores y altitudes mas bajas.

La base para el funcionamiento de los sistemas NDB es que la máxima señal en una antena de apertura será recibida cuando el receptor está alineado en la dirección de la señal radiada. Una señal mínima, o nula, se produce cuando la antena se encuentra en ángulo recto con la dirección de la señal radiada. En la práctica, sin embargo, la posición del mínimo de la señal se utiliza, ya que puede ser determinada con más precisión que un máximo. Las radiofrecuencias asignadas a los NDB se seleccionarán de entre las que estén disponibles en la parte del espectro comprendida entre 190 y 1,750 kHz. [9].

Un equipo a bordo de la aeronave llamado Buscador Automático de Direcciones (ADF) determina la dirección relativa hacia la estación NDB respecto del avión. El equipo principal del ADF esta conformado por un receptor, antena de apertura, motor para manejar la antena de apertura, una antena fija, el equipo electrónico de control y un indicador a bordo. La Figura 3 muestra el esquema de los sistemas de ADF.

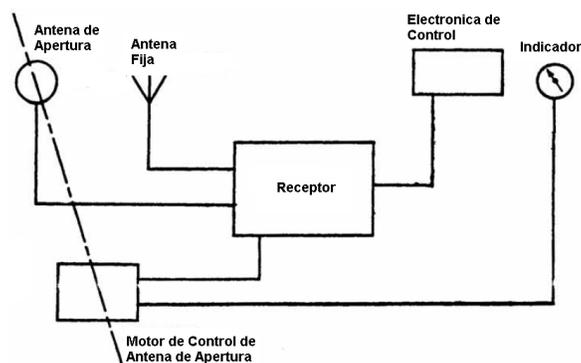


Figura 3. Esquema de equipo ADF.

Las estaciones NDB proveen de un método consistente a los aviones para definir espacios imaginarios en los que estos deben volar. La instalación situada en el Aeropuerto Internacional de El Salvador, tiene como nombre: AMATECAMPO, y el Código de Identificación (ID) OACI es LAN. Esta estación opera en la frecuencia de los 331 KHZ y es administrada por CEPA. Estas estaciones NDB pueden ser visualizadas en el esquema de la Figura 1.

**Sistema DME.**

Este es un equipo transpondedor basado en la medición del retardo de propagación de las señales de VHF y UHF [10]. La aeronave utiliza el equipo DME para determinar la distancia hacia una estación base terrestre transmisora por medio del envío y recepción de pares de pulsos con tiempos fijos de duración y separación. La frecuencia de este equipo puede ser encontrada en las cartas Jeppessen de navegación. El sistema comprenderá dos partes básicas, una instalada en la aeronave y la otra en tierra. La parte instalada en la aeronave se llamará interrogador y la de tierra transpondedor.

El DME opera transmitiendo y recibiendo pares de pulsos de la estación terrestre. El transmisor de la aeronave envía pulsos muy estrechos en una frecuencia de alrededor de 1.000 MHz. Estas señales se reciben en la estación de tierra y provocan una segunda transmisión en una frecuencia diferente. Estos pulsos de respuesta son percibidos por los circuitos de temporización en el receptor de la aeronave que miden el tiempo transcurrido entre la transmisión y recepción. Circuitos electrónicos dentro del equipo de radio llamado transpondedor, convierten esta medida en señales eléctricas en valores reales de distancia y velocidad respecto al suelo.

Estas estaciones están comúnmente instaladas junto a una estación VOR como lo ilustra la Figura 2. Una estación VOR puede normalmente ofrecer información de distancia a aproximadamente 100 aviones a la vez.

Tal como se muestra en la Figura 4, las estaciones DME brindan una medición oblicua hacia el objetivo, sin importar la diferencia de elevación de terreno donde se encuentren ya sea la estación en tierra o el avión en el aire.

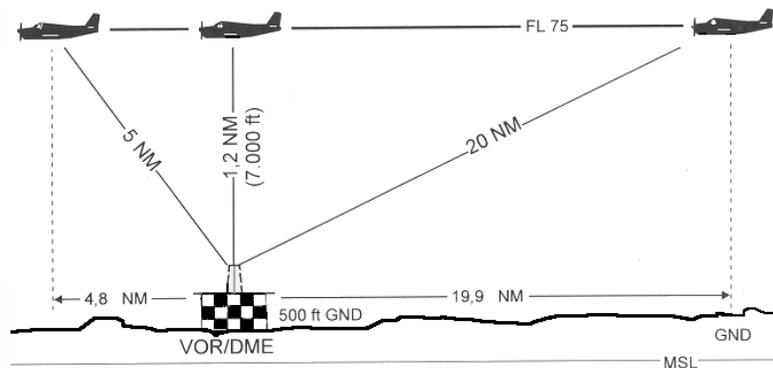


Figura 4. Medición de distancia desde un DME.

Con el ritmo de crecimiento de la aviación, estas estaciones en algunos sitios del mundo, se provee será insuficiente su servicio, especialmente en lugares donde el tráfico aéreo crece de forma abrumadora.

### **Sistema ILS.**

Este sistema funciona especialmente, para guiar a la aeronave hacia el aterrizaje en la última fase de vuelo, de manera segura sobre la pista. Utilizando una combinación de señales de radio y muchas veces un juego de luces sobre la pista, es de vital importancia cuando las condiciones meteorológicas y de visibilidad dificultan el aterrizaje [11].

Este sistema esta formado por 3 subsistemas que trabajan de forma conjunta:

- *Localizador*: Este brinda un espacio horizontal de aproximación óptimo para el aterrizaje y esta formado por un área definida donde dos frecuencias de radio específicas coexisten.
- *Glide Slope*: Cuyo patrón de radiación es parecido al localizador, a diferencia que este ofrece un espacio vertical definido de aproximación.
- *Marcadores*: Son estaciones fijas sobre la trayectoria de aproximación que indican la cercanía del avión hacia la zona de aterrizaje.



Figura 5. Instalaciones de antenas para Sistema de Aterrizaje por instrumentos.

Este sistema junto con el equipo electrónico instalado a bordo del avión, guía al avión durante la aproximación, por medio de pantallas de visualización que indican la dirección adecuada de descenso.

Este sistema se encuentra implementado en el Aeropuerto de El Salvador, únicamente para ser utilizado para los aviones que aterrizan sobre la pista 07. Esta pista también posee dos *marcadores* situados para su utilización sobre el aterrizaje de la pista 07, así como también el sistema de glide slope instalado para el aterrizaje sobre esta pista.

La pista 25 no cuenta con este sistema de instrumentos para el aterrizaje, pero es uno de los proyectos actuales de CEPA. Los aterrizajes por la pista 25, se realizan por medio del VOR/DME instalado en el aeropuerto.

## Sistemas de Vigilancia.

La vigilancia de los vuelos en todo momento de vuelo, es realizado por medio de radares. Los radares utilizados para este propósito son los denominados Radares Primario y Radares Secundarios [12].

El radar secundario es un equipo fundamental en los sistemas de vigilancia de navegación aérea. Habitualmente se encuentra asociado a un Radar Primario de Vigilancia (PSR, del inglés Primary Surveillance Radar) en funciones de radar de aproximación de aeropuerto, o en función del control del espacio aéreo va en solitario, normalmente en montañas elevadas.



Figura 6. Radar de vigilancia SSR y PSR.

Este tipo de radares brindan una cobertura de vigilancia con área definida en diferentes partes del mundo, y es una responsabilidad trasladada de una entidad a otra en el momento que los aviones cruzan espacios aéreos definidos. Este sistema es mayormente utilizados por los Controladores de Tráfico Aéreo (ATC), que son los responsables de brindar un nivel de vuelo seguro y controlado a las aeronaves sobre trayectorias de vuelo definidas y seguras.

El radar PSR es utilizado por la torre de control de el Aeropuerto de El Salvador y de igual forma es utilizado por COCESNA, que es el encargado de la vigilancia de los vuelos en la FIR centroamericana, en la que esta incluida El Salvador. La Figura 7 muestra la cobertura de vigilancia de los radares primario y secundario con los que cuenta El Salvador. En la figura se muestra que la cobertura del radar primario es de 80NM y del radar secundario es de 250NM.

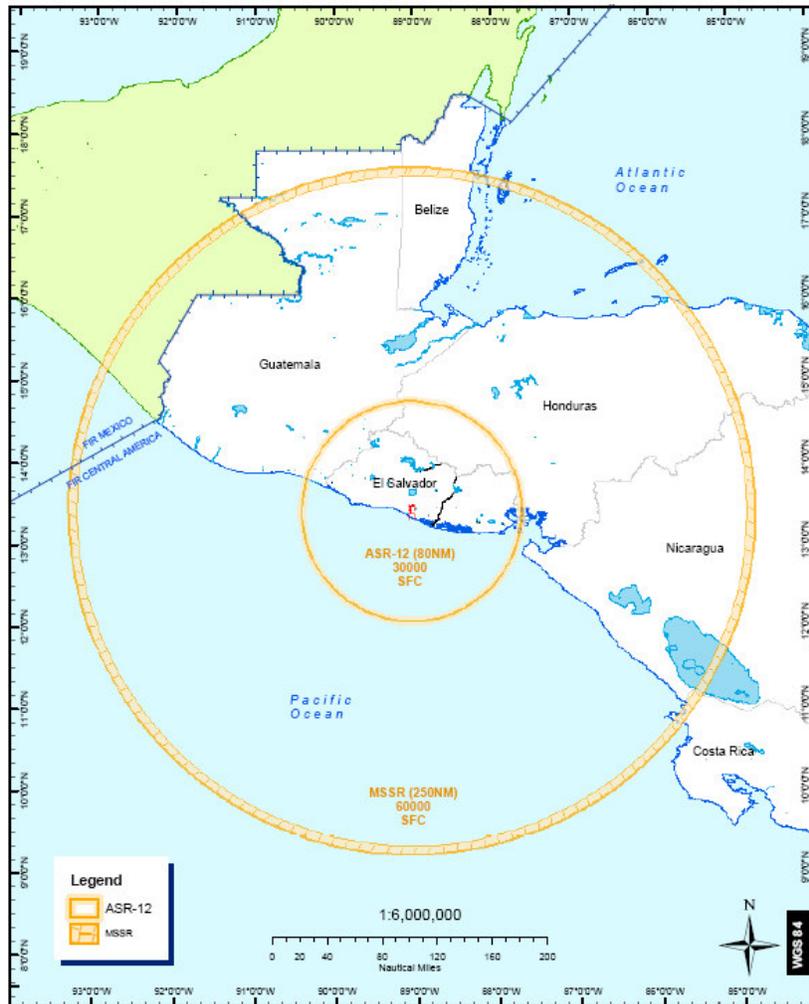


Figura 7. Cobertura de vigilancia de radar Primario y Secundario de El Salvador.

### 1.3 SISTEMAS DE NAVEGACION BASADOS EN POSICIONAMIENTO GLOBAL.

Todos los sistemas descritos anteriormente, son basados principalmente en estaciones terrestres que transmiten y reciben información en frecuencias de radio (HF, VHF y UHF) [13]. El futuro de la navegación es mediante el uso de satélites. La OACI ha introducido un concepto de desarrollo para la utilización futura de este tipo de recursos, denominado GNSS [14].

Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), será una constelación de satélites que transmitirá rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire.

Estos permitirán 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.

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.

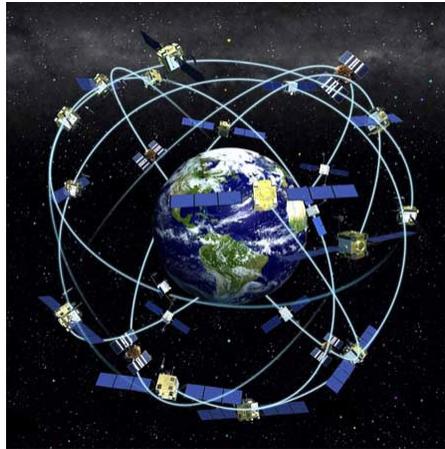


Figura 8. Constelación global de Satélites alrededor del planeta.

La navegación aérea utiliza, dentro del concepto de Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS) implementado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), los sistemas de posicionamiento, reconociéndose como un elemento clave en los sistemas de Comunicaciones, Navegación y Vigilancia que apoyan el control del tráfico aéreo (CNS/ATM) [15], así como un fundamento sobre el cual los estados pueden suministrar servicios de navegación aeronáutica mejorados.

Por concepto, el GNSS es un sistema mundial de determinación de la posición y la hora, que incluye constelaciones principales de satélites, receptores de aeronave, supervisión de integridad del sistema, y sistemas de aumento que mejoran la actuación de las constelaciones centrales.

En síntesis, el GNSS es un término general que comprende a todos los sistemas de navegación por satélites, los que ya han sido implementados (GPS) y los que están en desarrollo (Galileo, GLONASS) [16], proponiendo la utilización de satélites como soporte a la navegación, ofreciendo localización precisa de las aeronaves y cobertura en todo el globo terrestre.

Se está implantando el GNSS de una manera evolutiva a medida que esté preparado para acoger el gran volumen del tráfico aéreo civil existente en la actualidad, y pueda responder a las necesidades de seguridad que requiere el sector, uno de los más exigentes del mundo.

Estos sistemas, por la frecuencia de Operación en la que trabajan, las trayectorias que siguen las señales y los niveles de potencia a los que los sistemas son implementados, se prevé un tipo de vulnerabilidad en algunos aspectos de la implementación de este concepto nuevo de navegación.

Las constelaciones de GPS y GLONASS no se elaboraron para satisfacer los requisitos estrictos (precisión, integridad, disponibilidad y continuidad) de la navegación por instrumentos. Una explicación breve del significado de los requisitos operacionales es la siguiente:

Exactitud, diferencia entre la posición estimada y la real (medición de errores). Integridad. Confianza sobre la información total proporcionada (alertas de no utilización). Continuidad, funcionamiento sin interrupciones no programadas. Disponibilidad, es la parte del tiempo durante la cual el sistema presenta simultáneamente la exactitud, integridad y continuidad requeridas.

### Sistemas de navegación por satélite versus sistemas actuales.

El hecho de dar un nuevo paso hacia nuevas tecnologías de navegación, ofrece una ventaja sobre cada uno de los sistemas actuales de navegación, algunos de ellos mencionados son:

Como ocurre con otras formas de radionavegación aérea utilizadas actualmente, es posible que el VOR sea reemplazado por sistemas satelitales como el GPS. El GPS es capaz de localizar la posición horizontal de una aeronave con un error de sólo 20 m. Si se utiliza el GPS combinado con sistemas de aumentación (mas detalladamente en el Capítulo 4) el error se reduce a un cubo de 4 m de lado. Esta precisión instrumental se aproxima (con posicionamiento lateral y vertical) a la Categoría mas exigente de rango visual de aproximación de los sistemas ILS actuales. Una mayor precisión en la aproximación será obtenida por medio de estaciones instaladas en tierra denominadas Estaciones GPS Diferenciales (DGPS, del ingles Differential GPS) [17].

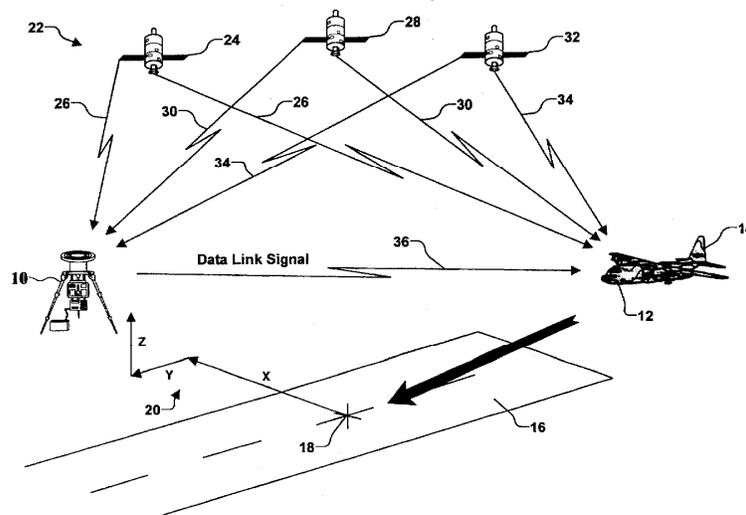


Figura 9. Sistemas de aumentación GPS para mayor precisión en la navegación.

El Capítulo 3 de este trabajo muestra la forma en que los principales sistemas de navegación basados en posicionamiento global están divididos y la operación específica de cada una de estas diferentes constelaciones de satélites. Así también como la forma en que los mensajes transmitidos por estos satélites están definidos, junto a sus frecuencias de operación, modos de operación, número de satélites por los que se encuentran conformados, órbitas de operación, entre otros.

En el Capítulo 4 se muestra un análisis de cómo el proceso de obtención de parámetros es calculado para llevar a cabo la navegación basada en posicionamiento global. Se define los métodos matemáticos utilizados para obtención de datos.

Finalmente, en el Capítulo 5 capítulo de este trabajo de graduación, por medio de una simulación de vuelo alrededor de una trayectoria definida en una parte del mundo, se mostrará el funcionamiento y visualización de la forma en que las aeronaves establecerán un vínculo de comunicación con los satélites. Esto pretende mostrar que las constelaciones futuras de satélites, tendrán la suficiente capacidad de mantener un link de datos que brinde una calidad de transmisión y recepción de datos adecuada.

Esto mostrará una de las ventajas más grandes que ofrecerá este nuevo sistema de navegación. Estas consisten en la creación de rutas más libres sobre el espacio aéreo, y no rutas restringidas a espacios en los que existen estaciones terrestres que brindan el servicio de posicionamiento de navegación de la actualidad.

Se pretende mostrar parámetros tales como tiempos de conexión, niveles de energía de señales, áreas de cobertura y áreas vulnerables de navegación con este tipo de sistemas. Estos parámetros son de vital importancia pues de ellos dependen muchos parámetros de calidad como la pérdida de datos y problemas en el establecimiento de un link de comunicación en todo momento de vuelo.

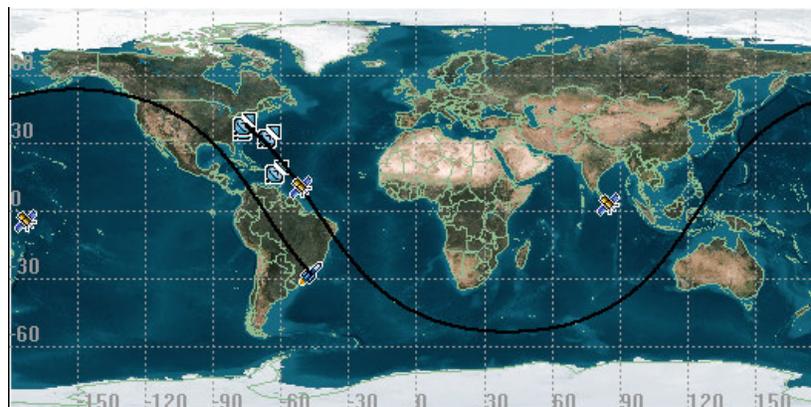


Figura 10. Generación de trayectorias de satélites y estaciones base terrestres.

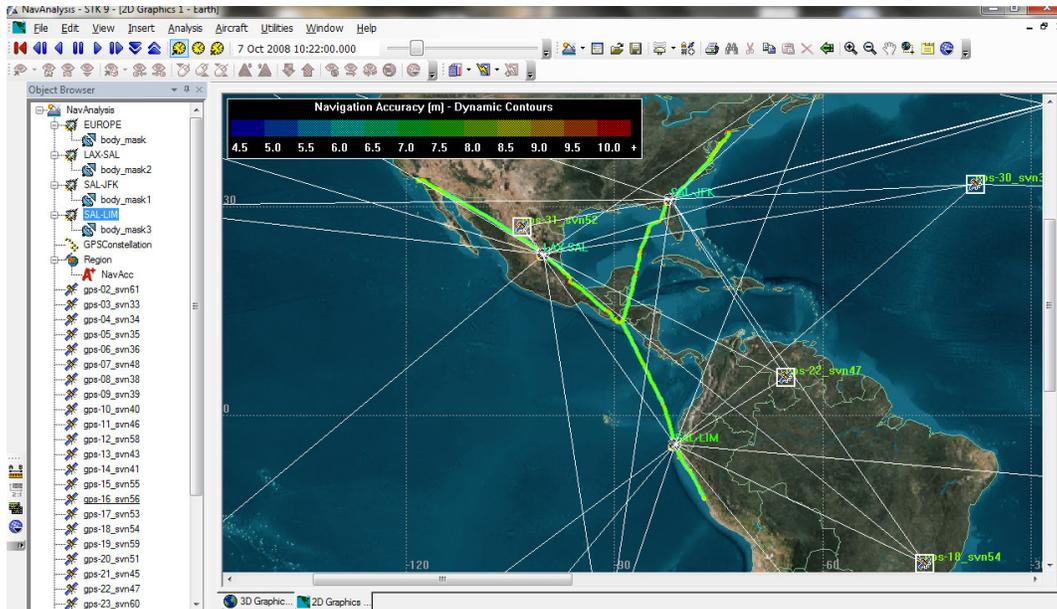


Figura 11. Posible trayectoria de vuelo a ser analizada.

La simulación será realizada por medio de un software llamado AGI (del inglés Analytical Graphics Inc.) [18] por medio del cual se obtendrá parámetros como los antes mencionados, y este contenido será mostrado en el Capítulo 5.

El objetivo final de la simulación es mostrar como el recurso de navegación aérea mediante sistemas de posicionamiento global brindará ventajas sobre cada uno de los sistemas existentes, y de que forma estos serán reemplazados por un sistema global. También se pretende mostrar la forma en que las rutas de navegación pueden ser optimizadas con menos distancias recorridas, y evitar uno de los mayores problemas del congestionamiento de los aeropuertos, lo cual se refiere a el tiempo de espera (*Holding*) que los aviones deben realizar cuando las condiciones de clima son inadecuadas, y condiciones de tráfico que no permiten un ingreso fluido de los aviones al descenso de los aeropuertos.

## CAPITULO 2. SISTEMAS DE NAVEGACION DEL FUTURO.

Este capítulo estudia las diferentes características de los nombrados sistemas GNSS, así como los diferentes elementos por los que estos se encuentran conformados.

En la primera sección de este capítulo, se estudia la definición, composición y características de un GNSS. Más específicamente, los segmentos por los que un GNSS está conformado. Además, la definición de los sistemas de aumentación, los cuales son de gran importancia para que las aplicaciones en el campo aeronáutico, cumplan los requisitos mínimos de operación establecidos por las autoridades internacionales.

En la segunda sección, se estudian las características únicas y específicas de cada uno de los distintos segmentos definidos en la primera sección. Además los diferentes servicios de los que dispone cada uno de los GNSS.

La última sección de este capítulo es referente a los requerimientos de los distintos GNSS. Por medio de la *definición del interfaz* se establecen las características básicas, radioenlaces que conforman el interfaz y servicios que se prestan, así como la estructura de la señal y de su contenido; y en la *descripción del interfaz* se definen las características RF de cada enlace, en cuanto a frecuencia y potencia necesaria en recepción

En la sección de *Estructura de códigos PRN* se muestra las características de los códigos de los diferentes servicios, tales como características de tasas de transferencia de datos y anchos de banda utilizados por cada uno de estos.

Por medio de la estructura del *mensaje de navegación*, se conoce la estructura de la trama, los campos y datos de los que está conformada la trama, así como la velocidad y frecuencia a la que estos son transmitidos.

En la estructura de las *señales de navegación* se muestra las frecuencias de operación de las señales. También se describen los diferentes tipos de modulación utilizados en la transmisión de señales.

La mayor parte de esta información ha sido extraída de los Documentos de la Interfaz de Control (ICD, de inglés Interface Control Document). Estos documentos pueden ser revisados en la carpeta de Archivos Anexos que se encuentra en el CD junto con la documentación de este trabajo de graduación.

Estos documentos son emitidos por los distintos GNSS donde se definen de forma obligatoria los diferentes parámetros de operación, los cuales son descritos a lo largo de las secciones de este capítulo.

El concepto de GNSS es relativamente reciente. Su historia comienza en los años 70 con el desarrollo del sistema estadounidense GPS. Este tuvo su origen en aplicaciones exclusivamente militares. Su cobertura a pesar de ser mundial, no era, como hoy se entiende "Global".

Es decir, era un sistema de uso exclusivamente militar cuyo control estaba bajo el Departamento de Defensa (DoD, del inglés Department of Defense) de los Estados Unidos, y sometido a un estricto control gubernamental.

No fue sino hasta que se empezó a tener en cuenta sus aplicaciones civiles, cuando el Gobierno de los Estados Unidos encargó realizar diversos estudios a distintas agencias como a RAND (del inglés Random and Development), con el propósito de analizar la conveniencia de emplear esta tecnología con fines civiles [19]. Así pues, tras diversos estudios, cuando esta tecnología comienza a emplearse con fines civiles, y a alcanzarse numerosos acuerdos entre el Gobierno Estadounidense y distintos países de todo el mundo.

Con el segmento espacial (red de satélites) perteneciente de manera exclusiva a los EEUU, el resto de países, como Japón, Australia, y el continente europeo, se centran en el desarrollo del segmento de tierra. Es decir, de los centros de control y recepción de las señales GPS, y de elaborar sistemas de aumento (Satellite Based Augmentation System SBAS, y Ground Based Augmentation System GBAS) para dicha tecnología, que les permitan obtener un posicionamiento más preciso a través de distintos métodos que se explicaran posteriormente. Esto plantea inquietudes a nivel internacional, ya que, la capacidad que tienen los EEUU para emitir la señal civil del GPS es también la misma para distorsionarla o dejar de emitirla en caso de guerra o conflictos entre países (lo que se entiende como disponibilidad selectiva). Surge así la necesidad para los demás países de tener su propio sistema de navegación por satélite, que les permita de manera autónoma disponer de esta tecnología sin dependencia de los EEUU [20].

Europa plantea Galileo como sistema con un uso exclusivamente civil, si bien los gobiernos de los distintos países podrán emplearlo también con fines militares. Rusia relanza el proyecto GLONASS. Otros países como China plantean el desarrollo de sistemas experimentales como COMPASS, la India IRNSS y Japón QZSS como sistemas regionales [21].

Si el GNSS plantea un futuro lleno de posibilidades, primero han de resolverse multitud de cuestiones: capacidades de los nuevos sistemas, interoperabilidad con el GPS entre otras cosas. Factores que implican a multitud de organizaciones, como agencias espaciales encargadas del desarrollo del sistema, gobiernos y otras agencias nacionales e internacionales encargadas de cuestiones legislativas. Han proliferado en multitud de países agencias, publicaciones, asociaciones de GNSS con el fin de proponer aplicaciones, soluciones y acuerdos así como educar sobre esta tecnología, debido en parte a su prometedor futuro, y en parte a su complejo entorno internacional [22].

## **2.1 DEFINICION, COMPOCISION Y CARACTERISTICAS DE GNSS.**

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: un *segmento espacial*, un *segmento de control*, un *segmento de usuarios*. No se entiende un GNSS sin alguno de estos tres elementos.

El segmento espacial hasta ahora ha pertenecido exclusivamente al GPS y al GLONASS (aunque su constelación de satélites no abarca una cobertura global), quedando relegados el resto de países a usarlos. Los segmentos de control se han implantado de distinta manera en cada país (Japón, EEUU, Rusia) o continente (Europa), dando lugar a los sistemas de aumento basados en tierra o satélite, comentados anteriormente.

### 2.1.1. SEGMENTO ESPACIAL

El segmento espacial está conformado por satélites de navegación y de comunicación. Los primeros orbitan alrededor de la Tierra, repartiéndose en distintos planos orbitales, los satélites de comunicación son los que forman los llamados *sistemas de aumento* (Augmentation Systems) que sirven para la corrección de errores de posicionamiento.

El segmento espacial de un GNSS debe tener el suficiente número de satélites de navegación, tales que éstos puedan garantizar una cobertura global en todo momento.

Además para ser lo suficientemente robusto en el servicio, ha de tener un número que le permita transmitir información de manera redundante en caso de que algún satélite deje de prestar servicio, o para que haya un mayor número de satélites en una zona que nos permitan obtener un posicionamiento más preciso.

Los satélites por otro lado, han de estar colocados en distintos planos orbitales de tal forma que se cubra toda la Tierra de manera global en todo momento (actualmente el GPS garantiza un mínimo de 4 satélites visibles en cualquier parte del mundo, como se muestra en el esquema de la Figura 12). Sin embargo dependiendo del número de satélites, la distribución dentro de estos planos orbitales no tiene porqué ser uniforme [24].

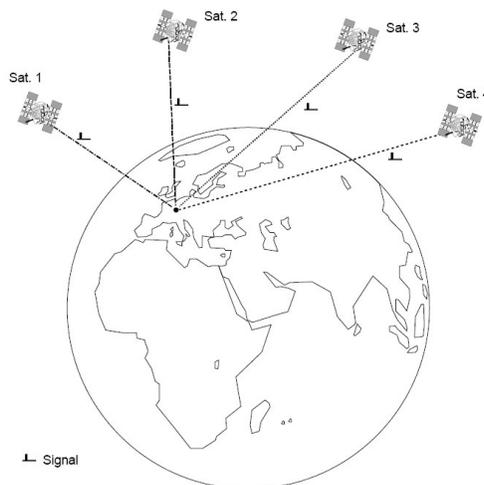


Figura 12. 4 satélites son requeridos para determinar la posición en un espacio 3-D.

Por otro lado, en el segmento espacial podemos encontrarnos satélites de comunicación Geoestacionarios, que forman los llamados sistemas de aumento, particulares de cada país. Dicho satélite retransmite la información con correcciones procedente del segmento de control, lo que aumenta la precisión del sistema. Ejemplos de sistemas de aumento son el WASS de EEUU, el EGNOS en Europa o el MFSAS de Japón y Australia [21].

### 2.1.2. SEGMENTO DE CONTROL

El segmento de control está formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites. El segmento de control es complejo en su definición, siendo propio de cada país o coalición de países, y estructurándolos en función de distintos criterios como más convenga. Sus funciones son garantizar las prestaciones del sistema mediante monitoreo del segmento espacial y aplicar correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los distintos satélites.

Este segmento es propio de cada país o coalición de países, estructurándolo en función de distintos criterios como más convenga, y está formado por un conjunto de estaciones en tierra que reciben los datos de los satélites. La función del segmento de control es la de garantizar las prestaciones del sistema de navegación, mediante el monitoreo del segmento espacial y la aplicación de correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los diferentes satélites.

### 2.1.3. SEGMENTO DE USUARIO.

El segmento de usuario está formado por los equipos GNSS que reciben las señales que proceden del segmento espacial.

Este segmento ha evolucionado mucho, desde sus principios donde un receptor era capaz de captar la señal de cuatro o cinco satélites, hasta la actualidad que tienen hasta doce o veinte canales, lo que permite un mejor posicionamiento.

Además del número de canales (o señales de satélite que es capaz de captar), los receptores también se caracterizan por los sistemas de corrección internos (como DGPS) y también por los protocolos que utiliza con distintos fines, como comunicaciones entre dispositivos (mediante USB, Bluetooth o NMEA 0183).

Por último decir que es de vital importancia la existencia de acuerdos entre distintos GNSS de forma que los receptores de un sistema puedan recibir señales de los satélites de otro sistema o de sistemas de aumento, lo que implica que en la actualidad se trate de buscar un consenso de cómo deben evolucionar los GNSS.

En la Figura 13, se muestra un esquema con cada uno de los elementos de los que esta conformados los diferentes segmentos que forman un GNSS.

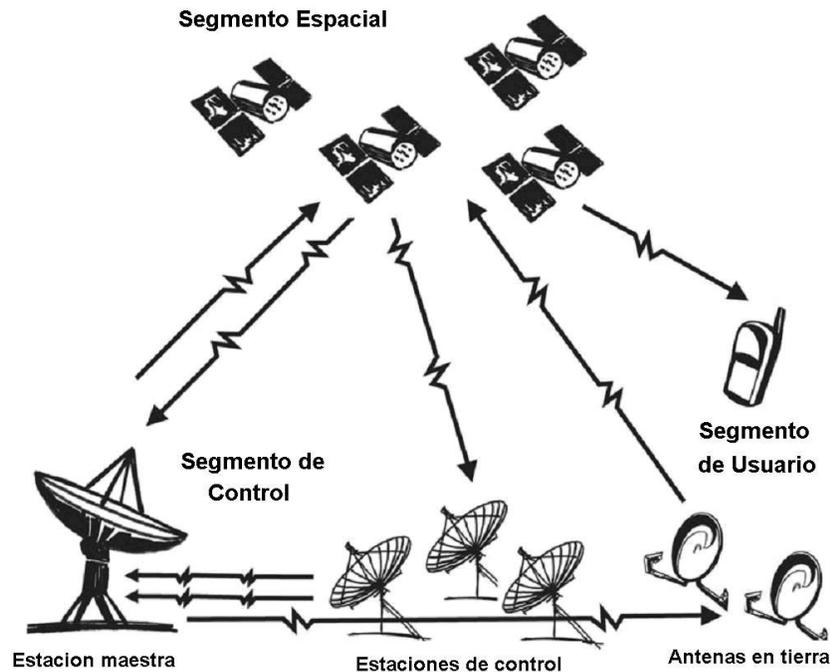


Figura 13. Segmentos de un sistema GNSS.

#### 2.1.4 SISTEMAS DE AUMENTACION GNSS.

El hecho de que EEUU tuviera el monopolio del segmento espacial por medio del sistema GPS, hace al resto de países del mundo dependientes de su sistema (aunque el GLONASS ruso está activo, no tiene suficiente cobertura para ofrecer un servicio global).

En una primera fase los países se centran en el desarrollo de sistemas de aumento (Satellite Based Augmentation System SBAS, Ground Based Augmentation System GBAS). Debido a la importancia que empieza a cobrar esta tecnología tanto por el número de posibles aplicaciones, como por el mercado que genera, se produce una segunda fase, liderada por Europa en la que se opta por desarrollar un segmento espacial propio que acabe con la dependencia del sistema estadounidense.

Esto se resume en la Figura 13, en la que muestra un esquema de los distintos sistemas:

GNSS-1: formado por el GPS y GLONASS actuales, junto con los sistemas de aumento que han surgido: SBAS, GBAS, ABAS.

GNSS-2: formado por el nuevo sistema Galileo, el reciente COMPASS chino y las actualizaciones de los actuales GPS y GLONASS.

En el esquema mostrado en la Figura 14, se muestra en que generación de GNSS se encuentran los diferentes sistemas de posicionamiento global, y en cuales de estos se realiza la implementación de sistemas de aumentación.

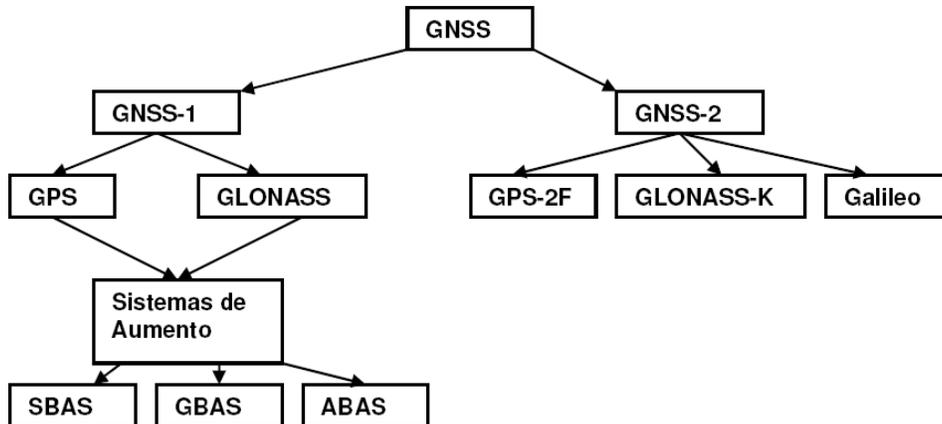


Figura 14. Representación de fases de desarrollo y fases actuales.

Tal y como lo muestra el esquema de la Figura 14, existen solo sistemas de aumentación solamente para aquellos satélites que forman parte de la primera generación del GNSS-1 como los son los primeros satélites de la constelación de NAVSTAR GPS y de GLONASS. Estos se deben a que los satélites implementados en la segunda generación GNSS-2 poseen muchas características mejoradas que los satélites de la generación 1 no tenían.

#### 2.1.4.1 SISTEMA DE AUMENTO BASADO EN AERONAVE: ABAS.

Son sistemas que emplean más de 4 satélites para calcular la posición, de esta forma son capaces de detectar fallos en el envío de información. En la actualidad se emplean dos sistemas:

- **Sistema Monitor de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM):** por un lado detecta fallos calculando su posición con la combinación de 4 satélites sobre 5 o 6 visibles, así sabemos cual es el satélite defectuoso. Por otro, la aeronave puede ahora actuar como otro satélite debido a su altitud ya que conoce su posición.
- **Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE):** esta funcionalidad permite descartar el satélite defectuoso para seguir empleando el GNSS de forma normal. Se encuentra en la mayoría de las aeronaves que se desarrollan en la actualidad.

#### 2.1.4.2 SISTEMA DE AUMENTO BASADO EN TIERRA: GBAS

Nace con el fin de dotar de mayor precisión al GPS y GLONASS para el tráfico aéreo. Los sistemas GBAS se diferencian de los SBAS en que ellos no dependen de los satélites Geoestacionarios (GEO), debido a que el GBAS no está diseñado para brindar su servicio sobre amplias regiones geográficas, se emplea en distancias cortas, por lo que es un LAAS, que es el nombre que le ha dado la FAA a su GBAS (del inglés Ground Based Augmentation System). El funcionamiento es sencillo, el GBAS vigila las señales GPS ó GLONASS en un aeropuerto y transmite correcciones diferenciales de distancia, mensajes de integridad locales y datos de aproximación directamente al receptor de a bordo mediante una radiodifusión de datos VHF.

En la Figura 15 se muestran los elementos del sistema GBAS y los elementos con los que esta interactúa en el esquema GNSS, especialmente los elementos del segmento de usuario.

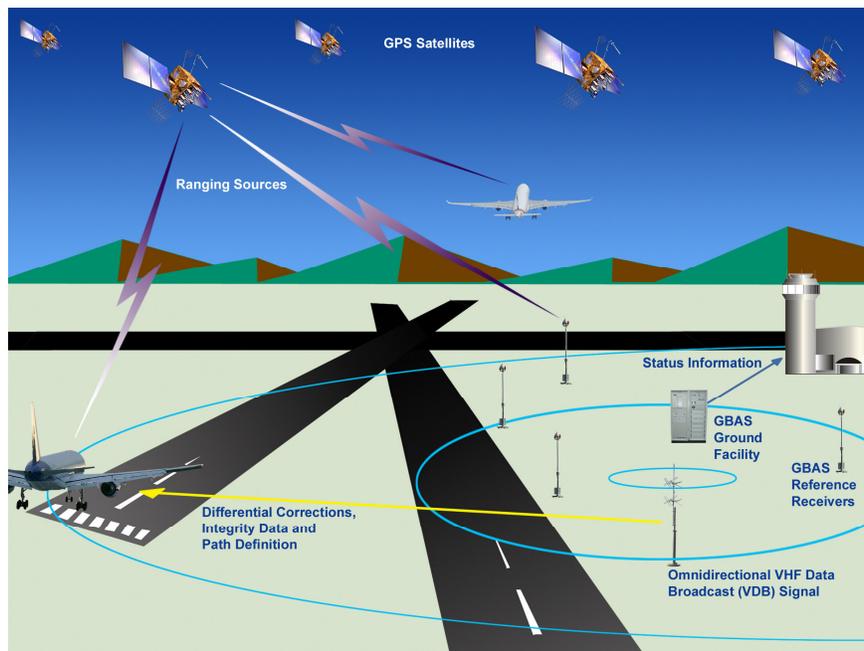


Figura 15. Sistema de aumentación basado en tierra.

#### 2.1.4.3 SISTEMA DE AUMENTO BASADO EN SATELITES: SBAS

Se conoce como SBAS al conjunto de sistemas de aumento desarrollados por distintos países que se basan en el uso de satélites geoestacionarios para mejorar las prestaciones de los actuales GPS y GLONASS.

Son sistemas que poseen una amplia cobertura y que por tanto tratan de mejorar en esas zonas las prestaciones del servicio de GPS y GLONASS.

Entre las funciones de mejora que ofrecen dichos sistemas se destacan:

-Aumentar la precisión de GPS y GLONASS: mientras que estos sistemas tienen una precisión de unos 20-70 metros, los SBAS ofrecen una precisión de entre 1 y 10 metros, variando de un sistema a otro.

-Incrementar la integridad del sistema informando de posibles fallos en satélites con mayor rapidez. Mientras que el GPS puede tardar 15 minutos para aplicaciones críticas, los actuales sistemas civiles requieren entre 6 y 30 segundos de retardo para informar de un fallo.

Los SBAS alcanzan este requisito, siendo así imprescindibles para ciertas aplicaciones.

-Incrementar la disponibilidad. Actualmente el GPS tiene una disponibilidad del 95-98%, mientras que sistemas como el EGNOS tienen una disponibilidad de hasta el 99.97%.

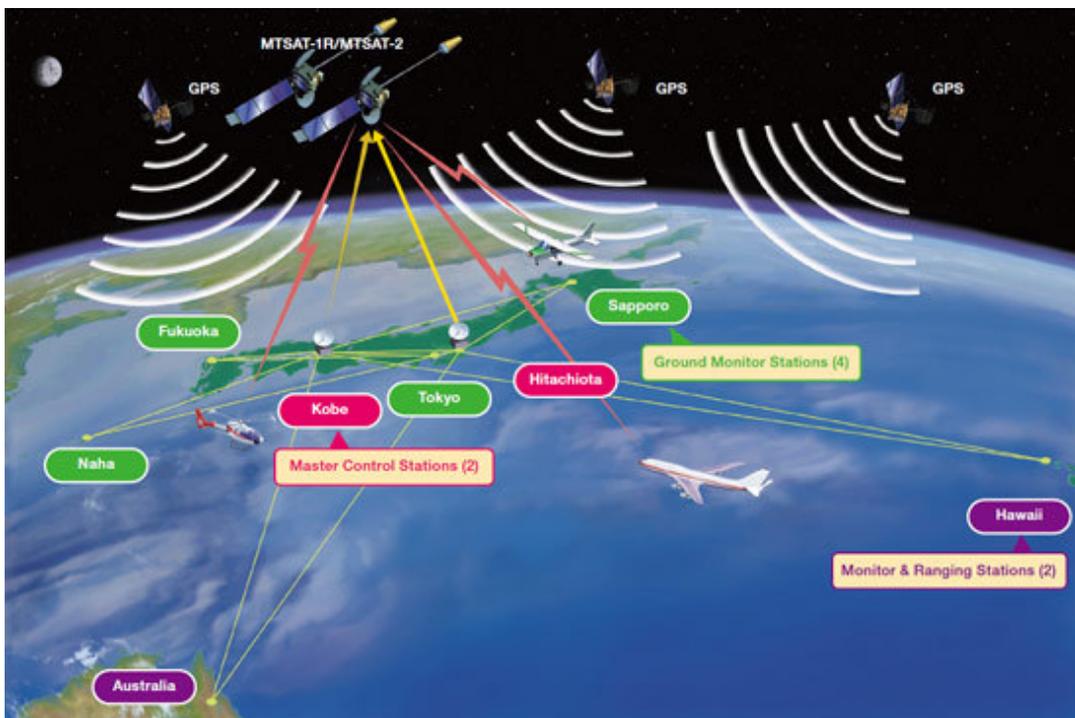


Figura 16. Sistema de aumento basado en satélites.

Las otras prestaciones que son la cobertura, quedan limitadas a la región del sistema de aumento, y la continuidad de servicio depende del propio sistema GPS o GLONASS, estando fuera de control para estos sistemas.

La arquitectura básica de todos los sistemas SBAS es mostrado mediante la Figura 16.

El SBAS está conformado por:

Segmento terrestre: una red de estaciones terrestres de referencia distribuidas por una amplia zona geográfica que monitorean a los satélites GNSS.

Segmento espacial: formado por el uno o varios satélites GEO. El funcionamiento es sencillo, el segmento de tierra retransmite los datos a una

instalación de procesamiento central en donde se evalúa la validez de las señales y se calcula correcciones a los datos de efemérides y reloj radiodifundidos de cada satélite.

Para cada satélite GPS o GLONASS vigilado, el SBAS estima los errores en los parámetros, y a su vez aplica las correcciones, que serán transmitidas a los satélites GEO y este las transmitirá a los receptores GNSS. La figura 17 muestra las diferentes áreas de cobertura de los sistemas SBAS implementados por las diferentes compañías a lo largo del mundo.

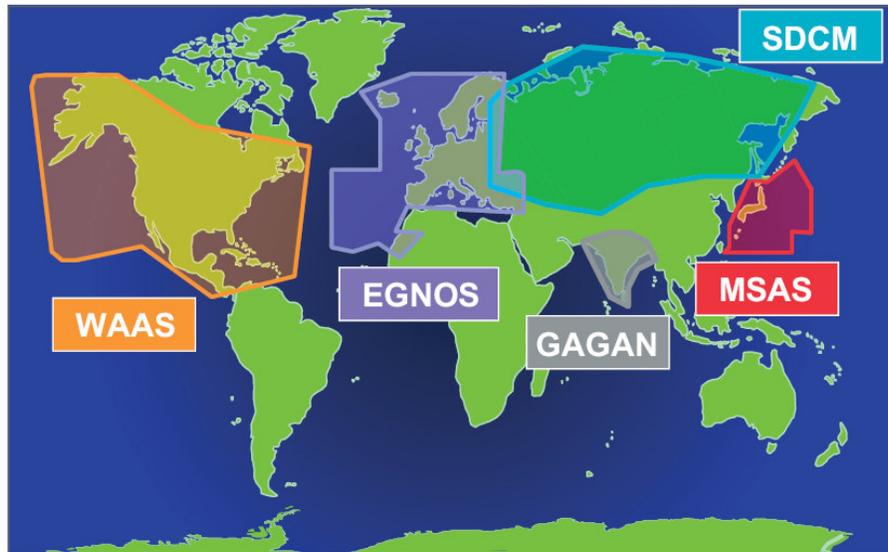


Figura 17. Sistemas de aumento existentes y planeados [22] .

## 2.2 SISTEMAS DE NAVEGACION POR SATELITE.

### 2.2.1 SISTEMA GLOBAL DE POSICIONAMIENTO (GPS).

El NAVSTAR GPS es hasta la fecha, el único sistema de posicionamiento global completamente operativo. El GPS tiene su origen en el sistema de navegación norteamericano TRANSIT que surgió en los años 60 como resultado de la colaboración entre los Departamentos de Defensa y Transporte de los EEUU y la NASA. TRANSIT tenía una cobertura mundial, sin embargo no es un GNSS, puesto que no ofrecía un servicio global ya que no era accesible las 24 horas del día.

#### 2.2.1.1 SEGMENTO ESPACIAL.

El segmento espacial del GPS diseñado en un principio constaba de 24 satélites distribuidos por igual en seis planos orbitales circulares distribuidos uniformemente con una inclinación de  $55^\circ$  sobre la línea del horizonte y una altitud de unos 20,200 Km. El período de cada satélite para completar una órbita es de unas doce horas, siendo la posición la misma al cabo de un día sideral [26].

Esto garantizaba un mínimo de cinco satélites disponibles en cualquier parte del mundo (normalmente seis), sin embargo se han ido añadiendo satélites que mejoren las prestaciones de servicio del GPS.

En la actualidad hay un total de 30 satélites en el segmento espacial del GPS, distribuidos no uniformemente y que garantizan unas mejores prestaciones en cuanto a disponibilidad e integridad que la constelación de 24 satélites.

Sin embargo, el estado y el funcionamiento de cada satélite varía de uno a otro, ya que algunos operan con relojes atómicos de Cesio y otros con relojes atómicos de Rubidio. Como se puede apreciar en la Figura 18, dividiendo la tierra en planos orbitales en función de la latitud y longitud se obtiene una red sobre la que posicionar los distintos satélites.

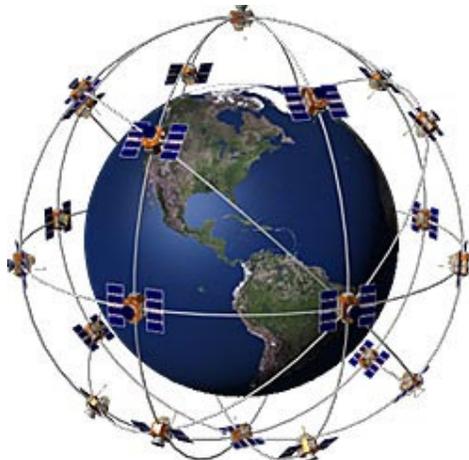


Figura 18. Distribución GPS original de 24 satélites.

Los satélites GPS se lanzaron en distintas fases, y a cada grupo de satélites se le conoce como bloque.

### **Bloque I de satélites GPS**

El primer bloque de satélites GPS está compuesto por los once primeros satélites que se lanzaron al espacio, adjudicados a Rockwell International. Se corresponden con los satélites del 1 al 11 lanzados entre los años 1,978 y 1,985. Fueron los satélites que sirvieron para validar el proyecto y estaban distribuidos a una altitud de 20,200 Km (10,900 millas náuticas) con un ángulo de inclinación de 63 grados.

Ninguno de ellos está ahora en servicio, si bien su tiempo de vida estimado era de 5 años, duraron más de lo previsto.

### **Bloque II de satélites GPS**

El segundo bloque de satélites que se lanzaron al espacio está compuesto por los satélites lanzados de 1989 a 2006. Los satélites diseñados entre estas fechas se conocen como BLOCK II, BLOCK IIA, BLOCK IIR y BLOCK IIR-M.

Se conoce como BLOCK II a los satélites a los satélites del 13 al 21 lanzados en 1989 y 1990. Fueron desarrollados también por Rockwell International y actualmente ninguno de ellos presta servicio, y fueron diseñados para ser capaces de prestar servicios durante 14 días sin contactar con el segmento de tierra.

El BLOCK IIA es el conjunto de satélites lanzados entre 1990 y 1997. Son los satélites del 22 al 40 y fueron diseñados para poder permanecer 180 días sin comunicarse con la estación de control. A lo largo de este período la degradación de la precisión del satélite se hace más patente. El tiempo medio de vida de BLOCK II y BLOCK IIA es de 7.3 años

El último conjunto de satélites lanzados al espacio es el BLOCK IIR que se lanzaron a partir de 1997, desarrollados por Lockheed Martin y que se corresponde a los vehículos del 41 al 62. Son más avanzados que los anteriores y pueden permanecer sin comunicar con el segmento de control 14 días y 180 navegando en modo autónomo sin sufrir casi degradación alguna en su órbita. Esto es posible gracias a un sistema de comunicación entre los satélites BLOCK IIR que les permite estimar los parámetros y alinearse sin contactar con el segmento de control. Su vida media es más larga, unos 7.8 años y son los que prestan servicio en la actualidad junto a los BLOCK IIA.

Los satélites BLOCK IIR-M son los tres últimos satélites lanzados al espacio en 2005 y 2006, y aunque se consideran del BLOCK IIR, tienen nuevas prestaciones como el código L2C en la banda de frecuencias L2.

### 2.2.1.2 SEGMENTO DE CONTROL.

El segmento de control del GPS está compuesto por los siguientes elementos: Estación de control maestra (MCS, del inglés Master Control Station) situada en Colorado en la base Falcon de la US Air Force. Existen además dos estaciones de reserva en California y Maryland [27].

Estaciones de control: situadas por todo el Globo, tres de ellas poseen antenas que transmiten información a los satélites, mientras que otras dos no.

Se conoce de manera muy precisa la posición de cada una de estas estaciones de acuerdo con las mediciones realizadas por el World Geodetic System en el 1972 y posteriormente en 1984. De ésta forma se puede conocer la precisión del GPS, ya que al calcular la posición de la estación por triangulación a partir de la información que envían los satélites GPS, se calcula la desviación sobre la posición exacta (medida) de la estación.

El funcionamiento del segmento de control es el siguiente: las estaciones de control (MCS, del inglés Monitor Control Stations) reciben la información de los satélites, acumulando datos sobre posición de éstos, mensajes etc. Dichos datos se envían a la MCS, que los procesa y aplica las correcciones necesarias en cuanto a órbitas y mensaje de navegación del satélite. La figura 19 muestra las diferentes estaciones del segmento de control GPS instaladas en las diferentes regiones del mundo.



Figura 19. Segmento de control de GPS.

Por medio de la sincronización se conoce la posición de cada estación y las coordenadas temporales, se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que determine la localización espacial y temporal del satélite para aplicar así las correcciones oportunas de los parámetros de navegación del mismo.

Por último dichas correcciones se transmiten por las estaciones de control que poseen antenas de tierra, que a su vez pueden aplicar correcciones de reloj, comandos de telemetría y otros mensajes, siendo una función exclusiva de la MCS la corrección de la órbita de los satélites. La transmisión de correcciones se realiza tres veces al día.

En caso de fallo de la MCS, las dos estaciones de reserva (Backup) estarían listas para funcionar de forma inmediata sin que se alterara el normal funcionamiento del sistema en ningún momento.

### 2.2.1.3 SERVICIOS GPS.

El GPS provee de dos niveles de servicio conocidos como Servicio de Posicionamiento Standard (SPS) y Servicio de Posicionamiento de Precisión (PPS):

SPS: es el servicio que está disponible a nivel global para todos los usuarios de GPS de manera gratuita. Al inicio su precisión horizontal era de unos 100 metros y vertical de 156 metros, debido a la Disponibilidad Selectiva (SA) actualmente en desuso. Su precisión de temporal es de 340 ns con respecto al UTC. En la actualidad, sin la SA precisión depende del número de satélites siendo de entre 10 y 20 m para al menos cuatro satélites. Esto puede apreciarse la Figura 2.6 donde la desactivación de la SA disminuye considerablemente el error de posicionamiento.

PPS: es el servicio militar de alta precisión, velocidad y servicio temporal, dirigido sólo a los usuarios autorizados por los EEUU. Permite una precisión de 2.2 metros horizontal, 27 metros vertical. Su uso militar excluye a los usuarios no autorizados encriptando dicha información.

## 2.2.2 GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GLONASS)

La contrapartida rusa al GPS es el GLONASS, desarrollado en conjunto por el Ministerio de Defensa ruso, Academia de las Ciencias y la Armada Soviética entre 1968 y 1969 [28].

El propósito oficial de este sistema es dotar de posicionamiento espacial y temporal, y medida de velocidad en toda la Tierra así como en el espacio cercano, a un número ilimitado de usuarios bajo cualquier circunstancia.

El GLONASS al igual que el GPS se compone de tres segmentos [29]. aunque el diseño adoptado para cada uno de ellos es distinto que el de GPS, si bien guardan muchas similitudes.

### 2.2.2.1 SEGMENTO ESPACIAL.

El segmento espacial de GLONASS está formado inicialmente por una constelación de 24 satélites en órbita, estando 21 en activo y 3 de repuesto. Éstos están distribuidos en 3 planos orbitales separados  $120^\circ$ , que contienen 8 satélites a 19,100 Km de altura con una inclinación de  $64.8^\circ$  y que tarda 11 horas y 15 minutos en completar un período.

En la actualidad hay 30 satélites en órbita de los cuales 24 son operativos y 6 están apagados de forma temporal [30]. Están distribuidos de manera no uniforme estando por ejemplo completo el primer plano y casi vacío el segundo. En la Figura 20 se muestra una distribución de los 24 satélites operativos de la constelación GLONASS.



Figura 20. Distribución de satélites GLONASS.

Desde que se empezó a desarrollar el sistema en 1982 se han desarrollado cuatro modelos de satélites.

La primera generación de satélites conocida como Block I se lanzó entre 1982 y 1985, diseñados con un tiempo de vida de 14 meses sirvieron como prototipos para la validación del GLONASS.

El segundo bloque de satélites se subdividió en distintos bloques, ha sido la más numerosa hasta ahora. Entre 1985 y 1986 se lanzaron seis satélites de Bloque IIa, tenían nuevos estándares de tiempo y frecuencia que mejoraban, con respecto de los prototipos, la estabilidad en frecuencia. Además tenían un tiempo de vida mayor, de unos 16 meses.

El último modelo fue el Bloque IIv, lanzados desde 1988 hasta el 2000 con un tiempo de vida de tres años, han llegado a durar más de 65 meses en órbita apagándolos de manera temporal. El modelo de satélites llamado *Uragan M*, constituyen la segunda generación de satélites GLONASS, con un tiempo medio de vida de 7 años. Fueron lanzados entre 2001 y 2007, con un total de catorce lanzamientos programados.

El modelo *Uragan K*, constituye la tercera generación de satélites, con un tiempo de vida de 10 años con lanzamientos programados desde 2009, es más ligera e incluye mejoras con respecto a su generación anterior. La Figura 21 muestra la evolución en los diseños de los satélites, de acuerdo a los bloques de cada época.

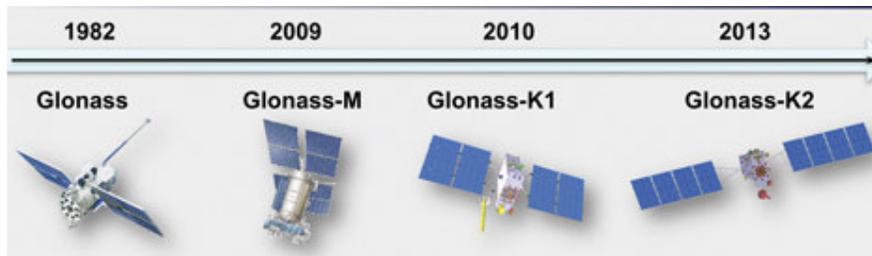


Figura 21. Evolución de satélites GLONASS.

### 2.2.2.2 SEGMENTO DE CONTROL.

El segmento de tierra cumple una función análoga a la del GPS, y provee de control y monitorización de los satélites. El sistema de control central (SCC), se encuentra cerca de Moscú, mientras que las estaciones de Telemetría, Posicionamiento y Control (TT & C) están distribuidas a lo largo del territorio ruso.

La Figura 22 muestra las estaciones terrestres del segmento de control de GLONASS.

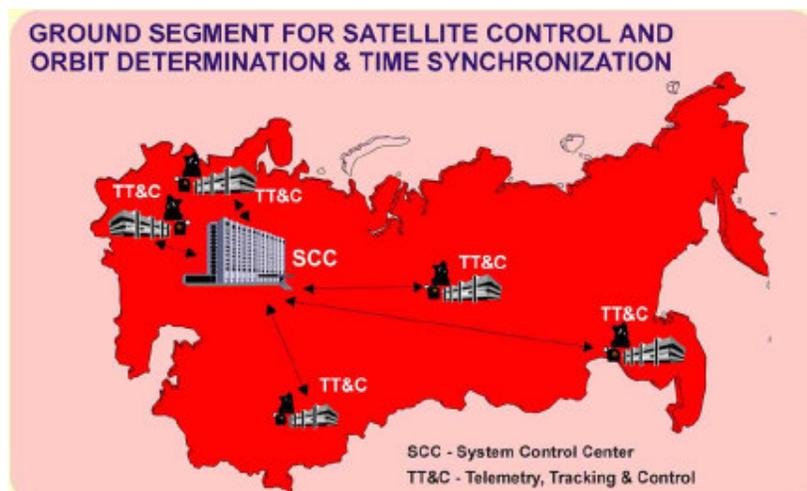


Figura 22. Segmento de Control GLONASS.

El segmento de control lleva a cabo las siguientes tareas:

- Monitorización del normal funcionamiento de la constelación orbital de satélites.
- Ajuste de parámetros orbitales de los satélites de forma continua.
- Generación y carga de programas, comandos de control, e información especial.

### 2.2.2.3 SERVICIO GLONASS.

En la actualidad, Rusia ha otorgado gran importancia al desarrollo de su GNSS, consciente de las ventajas políticas y económicas que le otorga a un país poseer su propio sistema de navegación.

Considerado como patrimonio nacional ruso, el GLONASS ha de ser mantenido incondicionalmente por el Gobierno Ruso, que en la actualidad busca ampliar el número de usuarios civiles de su sistema.

Al igual que el GPS, GLONASS ofrece dos tipos de servicio: una señal de precisión estándar (conocido como CSA), y una señal de alta precisión (CHA). El Gobierno Ruso ha decidido poner a disposición civil la señal estándar, para que pueda ser utilizada una vez esté completado todo el sistema. La señal se emite también en la banda L1 de frecuencias.

La señal CSA permite obtener la posición horizontal con una precisión de entre 57 y 70 metros (99.7% de probabilidad), la posición vertical con una precisión de 70 metros (99.7% de probabilidad).

### 2.2.3 SISTEMA EUROPEO DE NAVEGACION (GALILEO).

Galileo es la respuesta europea al nuevo panorama internacional de GNSS, constituye el primero de los llamados GNSS-2, y se espera que genere multitud de beneficios económicos y puestos de trabajo en la Unión Europea.

Galileo se ha planteado como un sistema que permita ser independiente a Europa del GPS y el GLONASS, pero que sea complementario a ambos y que permita la interoperabilidad con éstos. Cuando el proyecto esté completado se dispondrá de 30 nuevos satélites que conjuntamente con GPS y GLONASS permitirá obtener un posicionamiento muy preciso.

El escenario de Galileo es particularmente interesante porque implica a diferentes países que han buscado la forma de actuar conjuntamente para desarrollar el nuevo sistema.

#### 2.2.3.1 SEGMENTO ESPACIAL.

El segmento planificado de Galileo constará de 30 satélites, distribuidos en tres planos, de los cuales 3 de los satélites serán de repuesto. Estarán situados a una altura de 23.222 km, con una inclinación de 56° sobre el ecuador, tardando 14 horas en completar una órbita a la Tierra, de tal forma que cada 24 horas se repita la constelación, que posee además simetría esférica.

Dicho segmento además será interoperable con el GPS americano y el GLONASS ruso, y podrán verse al menos 4 satélites en cualquier parte del planeta con un 90% de probabilidad, si bien en la mayor parte de las zonas del planeta entre 6 y 8 satélites serán visibles.

El primer satélite que fue lanzado al espacio, GIOVE-A (Galileo In Orbit Validation Element), desarrollado por la ESA, sirvió para comprobar las tecnologías críticas desarrolladas por la ESA. El lanzamiento se produjo el 28 de Diciembre de 2005 [31].

El satélite comenzó a transmitir señales de forma exitosa el 12 de Enero de 2006. Estas señales sirvieron para:

- Verificar las tecnologías desarrolladas: incluyendo el reloj atómico de Rubidio, el generador de señales de navegación
- Caracterización de las señales enviadas: incluyendo la verificación de los receptores de usuario y su resistencia a la recepción multi-path, en un entorno real.
- Caracterización de la radiación de la órbita terrestre media: ya que ésta podría añadir campos electromagnéticos que condicionaran el diseño del sistema.

El cohete Soyuz, el ultimo satélite lanzado hasta la fecha del programa Galileo, despegó el día 21 de Octubre de 2011 desde el Centro Espacial Europeo de Kúrú la base espacial de la Agencia Espacial Europea (ESA) [32].

### 2.2.3.2 SEGMENTO CONTROL.

Como se ha explicado antes el sistema Galileo cuenta con una serie de elementos que poseen distintas funciones, elementos globales, regionales y locales explicados anteriormente.

En cuanto al segmento de control el componente global de Galileo comprende dos estaciones maestras GCC que llevan a cabo funciones de control y de misión con dos segmentos dedicados en exclusiva a cada una de estas funciones:

Ground Control Segment (GCS): red de cinco estaciones TT&C distribuidas por todo el mundo que prestarán el servicio necesario a los GCC para que puedan llevar a cabo sus funciones de control. Los dos GCC son los encargados de administrar los satélites y su mantenimiento en órbita. Se comunicarán con cada satélite de manera regular y programada, para ello cada estación cuenta con una antena de 13 metros capaz de operar en la banda de 2 GHz. Son el equivalente a la MCS de GPS.

Galileo Mission Segment (GMS): formada por una red global de 30 estaciones, Galileo Sensor Stations (GSS), encargadas de monitorizar las señales emitidas por los satélites.

Las GSS se encargarán de dos funciones; determinar la órbita y sincronización temporal de los satélites (OD&TS), y monitorizar la integridad de la señal emitida por los satélites, retransmitiendo dicha información a satélites multidifusión que enviarán la información de integridad de la señal al segmento usuario.

La información de los mensajes de navegación e integridad se enviará a las instalaciones GMS que poseen los GCC, donde se procesará dicha información y se enviará a los satélites de Galileo a través de los Mission Uplink Stations instalados en cinco puntos, a través de antenas de 3m en la banda de 5 GHz.

### 2.2.3.3 SERVICIOS GALILEO.

Como primer Sistema de Navegación de nueva generación, Galileo ha sido diseñado para ofrecer una mayor cantidad de servicios que aquellos que fueron definidos para GPS y GLONASS. Galileo va a soportar los siguientes servicios de usuario:

Open Service (OS): el Servicio Abierto estará cubierto mediante dos señales de navegación de diferente frecuencia. El Servicio Abierto será gratuito para todos los usuarios provistos de un receptor Galileo. Este servicio está pensado para aplicaciones de uso masivo como por ejemplo: navegación automovilística e hibridación con teléfonos móviles.

Comercial Service (CS): el Servicio Comercial es un servicio de pago que proporcionará información de posición y tiempo para productos profesionales y comerciales de valor añadido.

Public Regulated Service (PRS): la naturaleza de las señales PRS, implican un servicio robusto y resistente a las interferencias o cualquier otra agresión accidental o deliberada. La información PRS será cifrada.

Aunque las aplicaciones y los usuarios no están todavía definidos pueden establecerse los siguientes grupos:

Aplicaciones públicas dedicadas a la seguridad, como policía, protección civil, aplicaciones judiciales (control o seguimiento de personas, etc.).

Aplicaciones en sectores críticos como energía, transporte y comunicaciones.

Actividades económicas o industriales consideradas de interés estratégico para Europa.

Aplicaciones militares.

Safety of Live Service (SoL): los Servicios relacionados con la seguridad para la vida proporcionan una señal de integridad, que puede estar cifrada, ligada a un tiempo límite de alarma, como ejemplo típico puede considerarse la aviación comercial. Este servicio permitirá aterrizaje de precisión CAT- I [33]. La combinación de Galileo con GPS podría hacer que pudieran ser utilizados conjuntamente como medio único de navegación.

## 2.3 REQUERIMIENTOS DE NAVEGACION SATELITAL.

En esta sección se muestra la normativa de los GNSS, y de cada uno de los tres sistemas asociados al concepto GNSS: GPS, GLONASS y GALILEO.

Por medio de la interfaz de un GNSS se especifica los parámetros que establecen la comunicación entre el segmento espacial y los equipos de los segmentos de control y de usuario. Define los enlaces de radiofrecuencia utilizados, así como los códigos de posicionamiento y datos necesarios que conforman la señal de navegación para que los satélites provean señales de cobertura global y puedan llevar a cabo su misión. Dichos interfaces están definidos en los documentos de control de interfaz (ICD, de inglés Interface Control Document) de los distintos sistemas. Los documentos ICD de GPS, GLONASS y GALILEO se encuentran en la carpeta de archivos anexos del CD adjunto al trabajo.

La sección de normativas para GNSS muestra los aspectos y estándares definidos para que puedan coexistir los distintos GNSS. Dichos aspectos son dictados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, del inglés Interantional Telecommunications Union) a través de distintas conferencias.

### 2.3.1 NORMATIVA UIT.

El hecho de que existan distintos GNSS, implica que deben poder coexistir sin interferir unos con otros, esto es así en todos los niveles:

- **Interfaz:** las señales definidas para cada GNSS no deben interferir con las de los demás, es decir, deben estar alocadas en distintas bandas de frecuencia o dentro de una misma banda ocupando su ancho convenientemente.
- **Segmento espacial:** las comunicaciones del segmento espacial no debe interferir con otro tipo de comunicaciones, como los satélites de comunicaciones móviles, u otras señales de radio. Además los satélites deben distribuirse en distintos planos orbitales y alturas para no interferir con los de otros sistemas.
- **Segmento de control:** las señales que emita no deben interferir con otras comunicaciones y debe ser compatible con otros elementos como radares de radiolocalización.

Todos estos aspectos se regulan en las World Radiocommunication Conference (WRC) organizadas por la UIT [34]. Estas conferencias se celebran cada dos o tres años y su labor consiste en examinar y, en caso necesario, modificar el Reglamento de Radiocomunicaciones, que es el tratado internacional por el cual se rige la utilización del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites geoestacionarios y no geoestacionarios.

El espectro quedó aprobado en la WRC 2000 para los tres sistemas de la manera mostrada en la Figura 24:

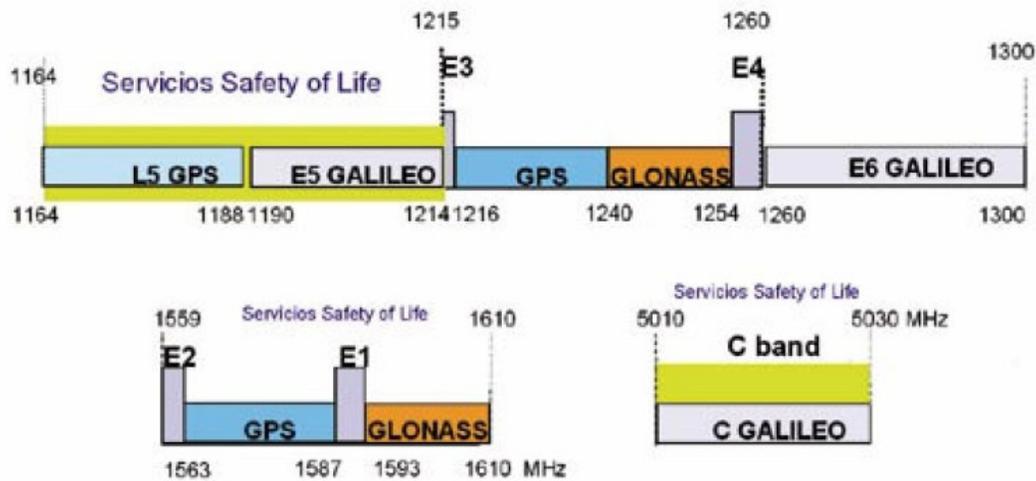


Figura 24. Distribución de las frecuencias aprobadas por la UIT.

## 2.3.2 GPS

### 2.3.2.1 DEFINICION DE LA INTERFAZ

El interfaz de GPS define dos enlaces RF, L1 y L2, por los que se transmiten las señales GPS. Dichos enlaces proveen de los códigos de posicionamiento y los datos necesarios, contenidos en el mensaje de navegación, para que el GPS lleve a cabo sus funciones. Para los códigos de distancia y mensaje de navegación viajen desde el satélite al receptor, las señales son moduladas a una frecuencia portadora, una a 1575,42 MHz.  $(10,23 \text{ MHz} \times 154)$  para L1, y una segunda a 1227,60 MHz.  $(10,23 \text{ MHz} \times 120)$  correspondiente a L2.

Los dos enlaces se encuentran en la banda L de frecuencias, y proveen de los dos servicios GPS, que son el Servicio Standard de Posicionamiento (SPS) y el Servicio de Posicionamiento de Precisión (PPS). La señal SPS se transmite por L1, mientras que la PPS es transmitida por ambos enlaces, lo que hace este servicio más robusto frente a errores, al transmitir de forma redundante la información por L1 y L2.

Dado la gran cantidad de aplicaciones desarrolladas para el GPS en los últimos años, el Gobierno estadounidense ha decidido actualizar el GPS para convertirlo en un GNSS-2. Los nuevos satélites (BLOCK-IIRM, BLOCK-IIF) [35] incorporarán nuevas señales que presten nuevos servicios:

- La banda L2C, destinada a la transmisión de información para aplicaciones civiles permitirá mayor precisión de posicionamiento, y actuará de forma redundante. Sus características tanto de potencia y como de información transmitida son distintas a L1.

- La banda L5, destinada al uso de aplicaciones Safety of Life al igual que Galileo, ocupa parte de la banda destinada a navegación aeronáutica con el fin de facilitar la recepción de señales de navegación por satélite a las aeronaves.

Las señales de navegación de los enlaces L1 y L2 se transmiten en espectro ensanchado (ver Apéndice A) y están moduladas por uno o más trenes de bits modulados en cuadratura, cada uno de los cuales está formado normalmente por la suma en módulo 2 del código de posicionamiento Pseudo Random Noise (PRN) y el mensaje de navegación [36].

El GPS utiliza la técnica de CDMA (ver Apéndice B) como método de acceso múltiple al canal en cada uno de sus enlaces para poder distinguir que satélite transmite la información, ya que cada satélite tiene un código PRN periódico propio.

### 2.3.2.2 ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN.

El interfaz de GPS define dos códigos PRN: P(Y) empleado para PPS, y C/A empleado en SPS.

- Código C/A

Se genera con dos registros de desplazamiento de 10 bits, a partir de la suma en módulo-2 de dos secuencias que conforman el código Gold de cada satélite: G1, común a todos los satélites y G2i(t), particular de cada uno, que permite la identificación del satélite que envía la señal. El código Gold tiene una longitud de 1023 chips (2<sup>10</sup>-1 chips).

Este código se transmite a 1.023 Mbps, con un período de 1 ms. Tiene las características necesarias de autocorrelación<sup>22</sup>. Al ser un código corto para permitir la rápida adquisición del código por parte del usuario.

- Código P

Se trata de un código PRN secreto dedicado al uso militar. Se genera con dos registros de desplazamiento de 37 bits, a partir de la suma en módulo-2 de dos secuencias: X1, común a todos los satélites y X2i(t), particular de cada uno. La longitud es de 15.345.037 chips (2<sup>37</sup>-1 chips). Se transmite a 10.23 Mbps y se repite cada 1 s.

El código P gana en propiedades de correlación respecto al C/A (la correlación cruzada con otros códigos es mínima), pero pierde en cuanto a propiedades de adquisición (es mucho más largo que C/A). Para solucionar este problema se emplea el código C/A, que es adquirido previamente para reducir el número de posibilidades y permitir de este modo la adquisición del código P de forma más rápida.

Esto es posible debido a que el código P se transmite exactamente a una velocidad 10 veces superior a la del código C/A.

- Código Y

Es empleada en vez del código P cuando el dispositivo de posicionamiento funciona en modo anti-spoofing (AS) [37].

### 2.3.2.3 ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION.

Cada satélite retransmite los datos requeridos para llevar a cabo el proceso de posicionamiento a través del mensaje de navegación. El mensaje de navegación consiste en un conjunto de 25 tramas de 1500 bits cada una, formadas a su vez por un conjunto de cinco subtramas etiquetadas de 300 bits cada una. Cada trama se transmite en 30 segundos por lo que la tasa es de 50 bps, y el tiempo de transmisión de un mensaje de navegación (25 tramas) es de 12.5 minutos [38].

Una trama esta dividida en 5 subtramas, y cada subtrama transmite información diferente:

**Subtrama 1:** contiene los valores de tiempo de la transmisión por satélite, incluidos los parámetros de corrección de retardo de la señal y el tiempo de reloj de a bordo, así como información sobre el estado del satélite y una estimación de la precisión de la posición del satélite..

**Subtrama 2 y 3:** datos de efemérides, que describen la órbita de cada satélite por un espacio de tiempo. Estos datos proporcionan una información muy precisa sobre la órbita del satélite.

**Subtramas 4 y 5:** páginas con datos del sistema como información UTC (tiempo de transmisión del satélite) o datos de almanaque de todos los satélites que nos dan una posición aproximada de la órbita de cada uno y que ayudan a calcular los errores de propagación, así como a determinar el estado de la constelación y buscar los satélites más apropiados para recibir señales. Cada satélite es capaz de almacenar datos de navegación de los últimos 60 días (tiempo mínimo de comunicación con el segmento de tierra).

De manera adicional cada trama contiene dos cabeceras que son la Telemetry Word (TLM) y la Handover Word (HOW) de 30 bits cada una generadas por cada satélite. La primera contiene datos de telemetría y la segunda información sobre la entrega de códigos C/A y P(Y). Contienen además bits de paridad para detectar posibles errores en la recepción del mensaje o generados por el propio satélite. El mensaje de navegación se transmite MSB, empezando por TLM.

La Figura 25 muestra la estructura completa del mensaje de navegación y la forma en que esta dividida.

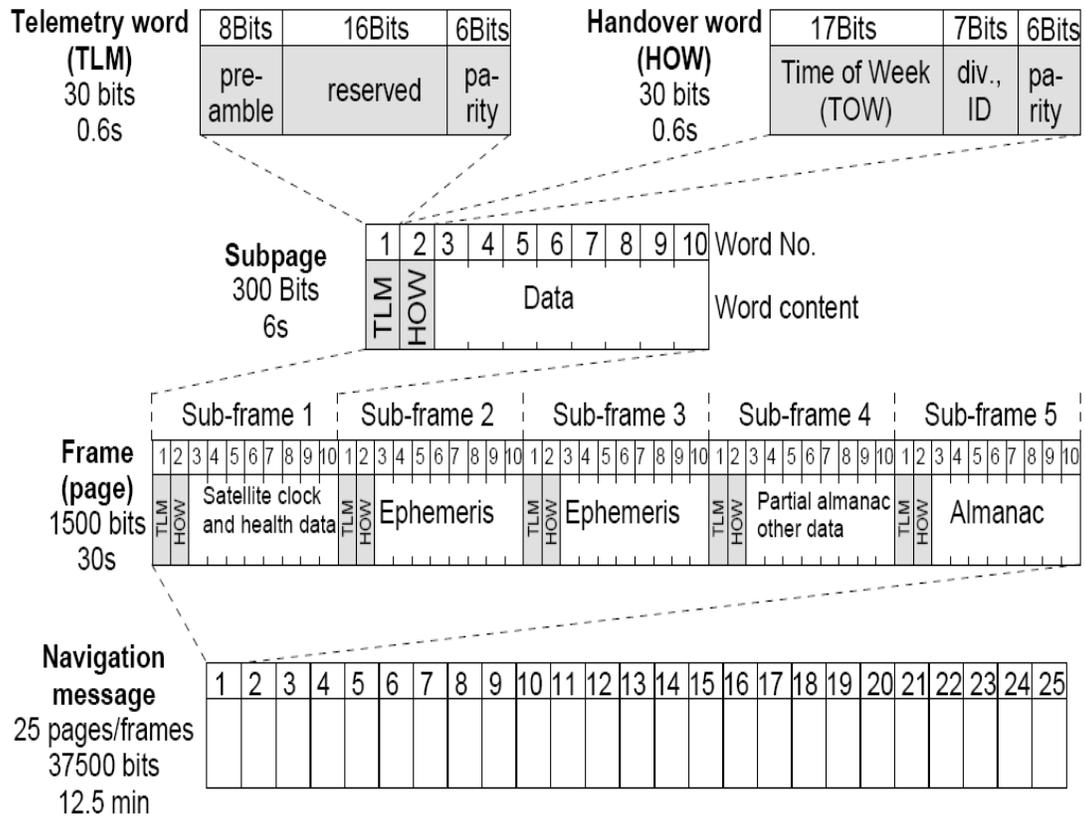


Figura 25. Estructura total del mensaje de navegación GPS.

#### 2.3.2.4 ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION.

La señal a frecuencia portadora L1 tiene dos componentes que están moduladas en cuadratura la una con la otra. Cada componente es una señal BPSK (Tabla 3.1) modulada por un tren de bits. En la Tabla 3.1 se presenta de forma resumida las posibles modulaciones que se dan en las bandas L1 y L2.

En el caso de SPS, este tren de bits es la modulación resultante (señal PRN) de la suma en Módulo-2 del mensaje de navegación  $D(t)$ , de 50 bps, junto con el código C/A, de 1,023 Mbps, en cuadratura (Tabla 3.1 columna L1 quadrature-phase). En el caso de PPS se transmite la suma en Módulo-2 del código P(Y) de 10.23 Mbps, junto con el mensaje de navegación en fase para la banda L1 (Tabla 3.1 columna L1 In-phase). En L2 pueden transmitirse hasta tres posibles trenes de bits.

SV Blocks	L1		L2**	
	In-Phase*	Quadrature-Phase*	In-Phase*	Quadrature-Phase*
Block II/IIA/IIR	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$ or $C/A \oplus D(t)$	Not Applicable
Block IIR-M***	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$	$L2\ CM \oplus D(t)$ with $L2\ CL$ or $L2\ CM \oplus D'(t)$ with $L2\ CL$ or $C/A \oplus D(t)$ or $C/A$
Block IIR-M/IIF	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$	$L2\ CM \oplus D_c(t)$ with $L2\ CL$ or $C/A \oplus D(t)$ or $C/A$

Tabla 3.1. Configuración de la señal GPS.

En la actualidad, en L1 estas modulaciones están definidas, mientras que en L2 sólo está definida la modulación en fase para el bloque de satélites II/IIA/IIR. Dicha modulación está formada por un tren de bits de entre los posibles (Tabla 3.1, fila II/IIA/IIR), que se selecciona en el segmento de control.

En los nuevos satélites (Bloque IIR-M, IIF) debido a las nuevas aplicaciones civiles se han planificado nuevos códigos para nuevas modulaciones, y se comenzará a transmitir dos portadoras en fase y cuadratura al igual que en L1 (Tabla 3.1 columna L2 quadrature-phase).

Banda	Señal portadora	Fase	Uso Actual	Uso Futuro
L1	1575.42 MHz (154*f <sub>0</sub> )	En fase (I)	Código P(Y)	Código P(Y) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)	Código C/A	Señal L1C con código C/A de uso civil
L2	1227.60 MHz (120*f <sub>0</sub> )	En fase (I)	Código P(Y)	Código P(Y) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)		Señal L2C con código C/A de uso civil
L5	1176.45 MHz (115*f <sub>0</sub> )	En fase (I)		Señal piloto SoL
		En cuadratura (Q)		Señal de datos SoL

Tabla 3.2. Planificación de distribución de frecuencias.

En la Tabla 3.2 se define el plan de frecuencias para las señales GPS, tanto las bandas existentes (L1, L2) como la nueva L5, se han diseñado para que sean múltiplo de  $f_0=10.23\text{MHz}$  que es la frecuencia de reloj de los satélites GPS. En todos los casos la señal transmitida está polarizada circularmente con el sentido de la mano derecha.

Se considera que las señales GPS tienen un ancho de banda de 20.46 MHz para los dos enlaces L1 y L2, si bien para el código C/A es de 2.046 MHz el código P(Y) que se transmite por ambos enlaces tiene un ancho de 20.46 MHz.

### 2.3.3 GLONASS.

#### 2.3.3.1 DEFINICION DEL INTERFAZ

El interfaz de GLONASS entre el segmento espacial y el segmento de control y usuario consiste, al igual que en el GPS en el uso de dos enlaces RF, situados en la banda L, L1 y L2.

GLONASS utiliza la técnica de multiplexación por división en frecuencia (FDMA) en ambas bandas (ver Apéndice B). Esto implica que cada satélite transmite la señal de navegación con su propia portadora, siempre distinta del resto de satélites de la constelación. Puede transmitir en la misma portadora que otro satélite si se encuentran en la parte opuesta del mismo plano orbital.

GLONASS provee dos tipos de señales en las bandas L1 y L2, conocidas como señal estándar (CSA, del inglés Chanel os Standard Accuracy), que presta el servicio civil, y señal de alta precisión (CHA, del inglés Chanel of High Accuracy) para uso militar. El CSA comenzó como servicio prestado en la banda L1 al igual que el SPS del GPS, y este servicio ha sido incorporado a la banda L2, de igual forma que lo plantea el plan de modernización de la red GPS.

#### 2.3.3.2 ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN

Los códigos de posicionamiento PRN de GLONASS son al igual que los de GPS el C/A y el P. GLONASS transmite el código P en ambas bandas L1 y L2 y el código C/A, de momento sólo en la banda L1, pero está programado que la Constelación GLONASS-M lo transmita también en la banda L2 para uso civil.

##### **Código C/A**

Se genera con un registro de desplazamiento de 9 bits, lo que proporciona una longitud de 511 chips (29-1 chips). Este código se transmite a 0.511 Mbps, con un período de 1 ms. Tiene las características necesarias de autocorrelación, y se elige un código corto para permitir la rápida adquisición del código por parte del usuario.

##### **Código P**

Se trata de un código PRN secreto dedicado al uso militar, por lo que la información disponible sobre éste código es poca. Es un código generado mediante un registro de desplazamiento de 25 bits, por lo que la longitud es de 3355431 chips (29-1 chips). Se transmite a 5.11 Mbps y se repite cada 1 s.

El código P gana en propiedades de correlación respecto al C/A, pero pierde en cuanto a propiedades de adquisición ya que hay 511 millones de cambios de fase posibles.

Para solucionar este problema se emplea el código C/A, que es adquirido previamente para reducir el número de posibilidades y permitir de este modo la adquisición del código P de forma más rápida. Esto es posible debido a que el código P se transmite exactamente a una velocidad 10 veces superior a la del código C/A, por lo que no es necesario el empleo de la palabra HOW utilizada en GPS.

### 2.3.3.3 ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION

A diferencia del GPS, el GLONASS emplea dos mensajes de navegación diferentes que van sumados en modulo 2 a los códigos C/A y P respectivamente. Ambos mensajes de navegación son transmitidos a 50 bps, y su función primaria es la de proporcionar información a cerca de las efemérides de los satélites y la distribución de los canales.

Cada mensaje de navegación proporciona dicha información a través de dos tipos de datos conocidos como datos inmediatos y no inmediatos. Los inmediatos son aquellos que proveen de información del satélite, y los no inmediatos son aquellos que proveen de información relacionada con la constelación de GLONASS (datos de almanaque).

#### **El Mensaje de Navegación C/A**

Está constituido de manera jerárquica, por un patrón de bits que se repite. Dicho patrón es una trama que tarda 2.5 minutos en transmitirse y que está formada por 5 subtramas de 30 segundos cada una, y éstas a su vez por 15 cadenas de 2 segundos de duración. La información contenida en palabra del mensaje es:

- Las cuatro primeras palabras de cada subtrama contienen las efemérides propias del satélite. Al igual que en GPS, las efemérides tiene varias horas de validez, por lo que el receptor no necesita estar leyendo continuamente el mensaje de navegación para calcular la posición exacta.
- El resto de palabras contiene información de efemérides aproximadas del resto de satélites de la constelación (almanaque). Cada subtrama tiene la información del almanaque de 5 satélites, por lo que es necesario leer todas las subtramas para conocer las efemérides aproximadas de todos los satélites, lo que lleva 2.5 minutos.

El orden en que se lee el mensaje es MSB y cada palabra se divide en: información (bits 9-84), bits de control (KX) del código Hamming y marca de tiempo (MB) que separa las palabras y el chip vacío (bit 85, que es "0").

En la Figura 26 se muestra la estructura completa del mensaje de navegación C/A y los códigos incluidos en cada numero de trama.

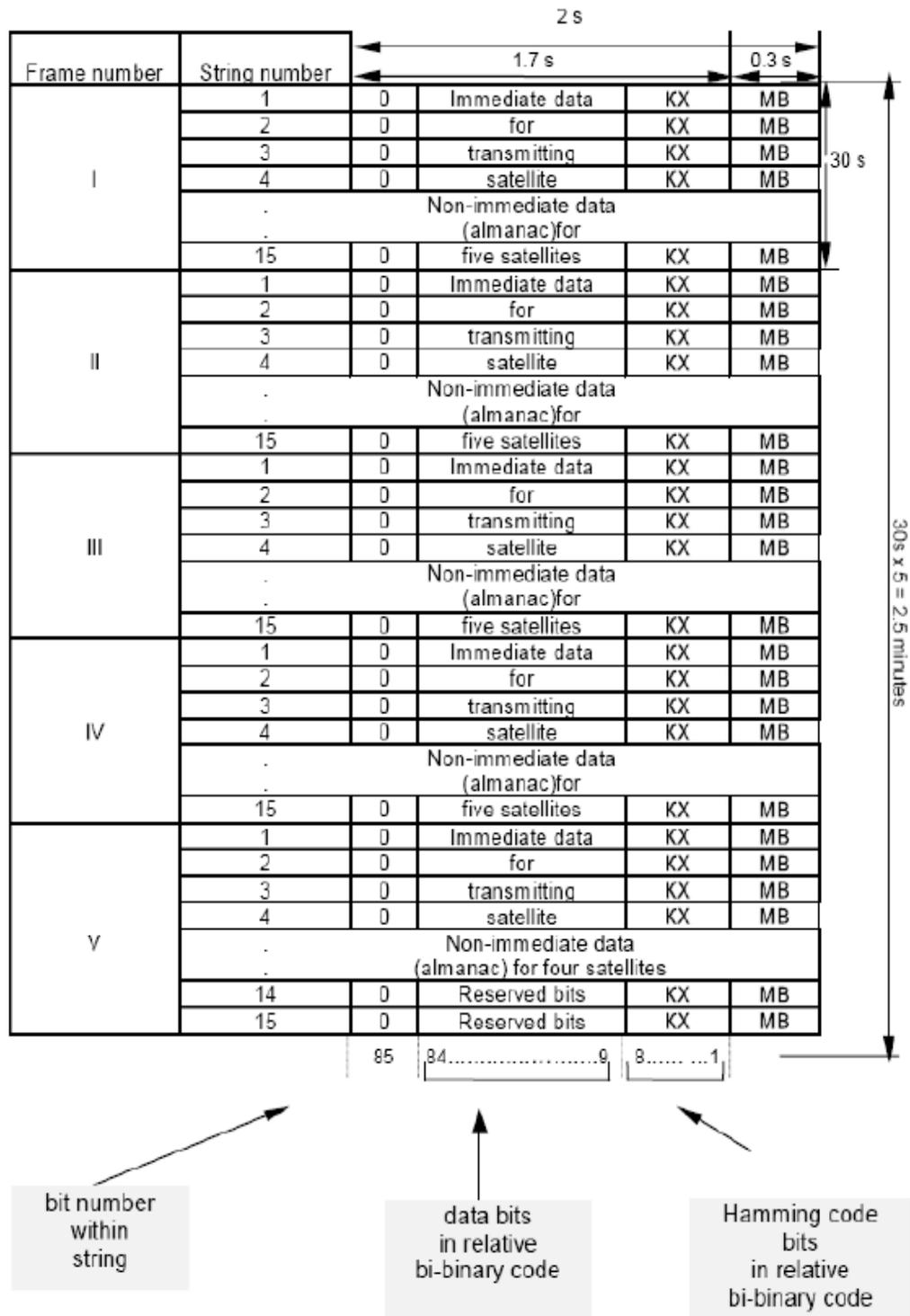


Figura 26. Estructura del mensaje de Navegacion C/A GLONASS.

### 2.3.3.4 ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION

Las señales de navegación transmitidas en ambos enlaces son señales BPSK moduladas por un tren de impulsos. Para la transmisión de sus señales la diferencia de fase de portadora es de  $\pi$  radianes.

En el enlace L1 empleado la señal se compone de:

- Código PNR C/A sumado en módulo-2 con el mensaje de navegación C/A y una secuencia auxiliar:  $C/A \oplus D C/A(t) \oplus A(t)$ , empleado para uso civil.
- Código PNR P sumado en módulo-2 con el mensaje de navegación P y una secuencia auxiliar:  $P \oplus D_P(t) \oplus A(t)$ , empleado para uso militar.

El enlace L2 se compone del código PNR P sumado en módulo-2 con una secuencia auxiliar:  $P \oplus A(t)$ , empleado para uso militar.

La actualización de los servicios y enlaces incluyen que L2 incorpore pronto la señal civil, y el nuevo L3 para señal civil y SoL.

Band	Señal portadora	Fase	Uso Original	Uso tras la modernización
L1	1602 MHz	Fase (I)	Código Militar	Militar
		Cuadratura (Q)	Código Civil	Señal L1 civil
L2	1246 MHz	Fase (I)	Código Militar	Militar
		Cuadratura (Q)		Señal L2 civil
L3	1201.5 MHz	Fase (I)		Portadora Señal L3 civil
		Cuadratura (Q)		Señal L3 civil

Tabla 3.3. Planes de frecuencias para señales GLONASS.

En la Tabla 3.3 se presentan las frecuencias portadoras definidas por el interfaz de GLONASS. Todas ellas derivadas de una frecuencia fundamental de 5 MHz. Como hemos visto a diferencia de GPS, cada satélite transmite en su propia frecuencia portadora, que se deriva de cada una de estas.

Banda L1

$$f_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1, \text{ donde } K = (-7, 13)$$

$$f_{01} = 1602 \text{ MHz}; f_1 = 562.5 \text{ kHz}$$

Banda L2:

$$f_{K2} = f_{02} + K \Delta f_2, \text{ donde } K = (-7, 13)$$

$$f_{02} = 1246 \text{ MHz}; f_2 = 437.5 \text{ kHz}$$

Estas frecuencias se han escogido porque las señales GLONASS creaban interferencias con las señales astronómicas de radio, que usan las bandas de frecuencia de 1610.6 - 1613.8 y 1660 - 1670 MHz, y para satélites de comunicaciones móviles.

Aunque las frecuencias sean menores que el número de satélites, dos satélites antipodales de un mismo plano, esto es, satélites separados  $180^\circ$  de latitud, pueden transmitir a la misma frecuencia ya que la transmisión de ambos no podría ser recibida simultáneamente.

## 2.3.4 GALILEO.

### 2.3.4.1 DEFINICION DE LA INTERFAZ.

El interfaz de Galileo define cuatro radioenlaces a través de los cuales establece sus servicios. Dichos enlaces se conocen como E1-L1, E5 (dividido en E5a y E5b) y E6. Cada enlace está dividido en sub-bandas (E5a, E5b, E6-A, E6-B, E6-C, E1-A, E1- B, E1-C). Por cada sub-banda del enlace se transmiten una o más señales que prestan los distintos servicios.

El interfaz de Galileo se muestra en la Tabla 3.4 donde se puede observar el mapeo entre servicios y canales por los que se transmiten, así como una breve descripción de las bandas de frecuencias y la estructura de cada señal.

Para cada sub-banda del enlace se definen dos canales, uno de datos y otro de portadora que conforman la señal transmitida. El canal de datos es el resultado de la modulación del código PRN, una subportadora si está presente, y una cadena de datos de navegación. El canal de portadora está formado por el código PRN y la subportadora.

Al igual que GPS, los satélites Galileo transmitirán sobre las mismas frecuencias en espectro ensanchado. Galileo empleará la técnica CDMA para distinguir la información de cada satélite. Las señales en espectro expandido serán transmitidas incluyendo códigos PRN diferentes para distintas señales y satélites.

Signal			Central Frequency MHz	Chip rate Mchip/s	Ranging Code Encryption	Data rate symbol/s (bit/s)	Data encryption	Reference Service
Id	Name							
1	E5a-I	data	1176.45	10	None	50 (25)	None	OS/SoL
2	E5a-Q	pilot	1176.45	10	None	No data	~	OS/SoL
3	E5b-I	data	1207.14	10	None	250 (125)	some	OS/SoL/CS
4	E5b-Q	pilot	1207.14	10	None	No data	~	OS/SoL/CS
5	E6-A	data	1278.75	5	Government	tbd	Yes	PRS
6	E6-B	data	1278.75	5	Commercial	1000 (500)	Yes	CS
7	E6-C	pilot	1278.75	5	Commercial	No data	~	CS
8	E2-L1-E1-A	data	1575.42	M	Government	tbd	Yes	PRS
9	E2-L1-E1-B	data	1575.42	2	None	250 (125)	Some	OS/SoL/CS
10	E2-L1-E1-C	pilot	1575.42	2	None	No data	~	OS/SoL/CS
11	L6 downlink	data	1544.10	~	~	~	~	SAR

Tabla 3.4. Definición de la interfaz de GALILEO.

### 2.3.4.2 ESTRUCTURA DE LOS CODIGOS PRN.

Los códigos PRN se generan a partir del desplazamiento de dos secuencias binarias conocidas como secuencia primaria y secuencia secundaria que se emplea para modificar las repeticiones de la primera secuencia. Dichos códigos varían en función del enlace en cuanto a número de chips, y también de un satélite a otro, a los que se asignarán distintos códigos.

Los códigos primarios se pueden generar de dos maneras distintas:

- Secuencias pseudo-aleatorias basadas en el desplazamiento lineal de registros.
- Secuencias pseudo-aleatorias optimizadas a partir de dos secuencias-M o de una secuencia almacenada en memoria.

En la Tabla 3.5 se muestra la longitud de cada código en función del canal por el que se transmite. Podemos calcular la tasa a la que se transmite cada uno como la longitud del código entre el tiempo que tarda en transmitirse. Así en el canal E5a-I si se transmite un código con una longitud total de 10230\*20 chips en 20 ms, su tasa es de 10.23 MHz, el canal E1 con un código de 4092 chips que se transmite en 4 ms tendrá una tasa de 1.023 MHz, y así para el resto.

Channel	Code Length (ms)	Code length (chips)	
		Primary	Secondary
E5a-I	20	10230	20
E5a-Q	100	10230	100
E5b-I	4	10230	4
E5b-Q	100	10230	100
E1-B	4	4092	-
E1-C	100	4092	25

Tabla 3.5. Longitud de los codigos PRN.

#### 2.3.4.3 GALILEO: ESTRUCTURA DEL MENSAJE DE NAVEGACION

Los mensajes de navegación son distintos para cada servicio que ofrece Galileo, y podemos distinguir cuatro:

- **Mensaje I/Nav**: transmitido a 125 bps contiene datos de integridad lo que le permite prestar servicios SoL, y datos encriptados, lo que le permite prestar servicio comercial, además del servicio abierto que presta.
- **Mensaje G/Nav**: mensaje encriptado con un algoritmo gubernamental.
- **Mensaje C/Nav**: mensaje encriptado por un algoritmo comercial transmitido a 500 bps.
- **Mensaje F/Nav**: mensaje transmitido a 25 bps con información básica de posicionamiento espacial y temporal.

Mensaje	Servicio	Canal
I/Nav	OS/CS/SOL	E5b-I
F/Nav	OS	E5a-I E1-B
G/nav	PRS	E6-A E1-A
C/Nav	CS	E1-B, E1-C E6-B, E6-C E5b

Tabla 3.6. Servicio por canal de información de GALILEO.

En la Tabla 3.6 podemos ver que servicios presta cada uno y por que canales se transmiten. De todos estos sólo se pueden estudiar el I/Nav y el F/Nav por ser el resto de acceso restringido.

### Estructura general

Todos los mensajes de navegación de Galileo se organizan de manera jerárquica como una estructura de tramas que se dividen en subtramas compuestas de páginas, estructura básica del mensaje así como lo muestra la Figura 27.

Cada página se compone de un campo de sincronización y otro de datos. El campo de sincronización permite sincronizarse a los receptores mientras que el campo de datos es el resultado de la transmisión del mensaje de información junto con una codificación de canal. La transmisión de cada página se realiza MSB.

### Mensaje F/Nav

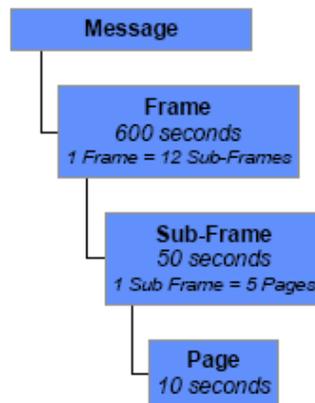


Figura 27. Estructura del mensaje FNAV.

El mensaje se compone de una trama de 30000 bits que tarda 10 minutos en transmitirse, y que consta de 12 subtramas de 5 páginas cada una, en total 2500 bits por subtrama.

La Figura 28 muestra la forma en que el mensaje FNAV está dividido. Cada página consta de 500 bits y tarda 10 segundos en transmitirse, de lo que se deduce que se transmite a 50 bps. Cada página consta de:

- **Bits de sincronización:** un total de 12.
- **Bits de datos:**
  - **Bits de cola:** permiten la decodificación FEC en recepción.
  - **Palabra:** contiene los datos útiles:
    - Tipo de página:** especifica que información aporta los datos de navegación.

- **Datos de Navegación:** 208 bits que pueden contener cualquier tipo de dato indicado en el campo anterior: datos de efemérides, de reloj, correcciones ionosféricas etc.
- **CRC:** que permite detección de errores.

Sync	Symbols	Total [symbols]
12	488	500

Page type	Navigation Data	CRC	Tail	Total [bits]
6	208	24	6	244

Figura 28 Estructura de pagina F/NAV.

### 2.3.4.4 ESTRUCTURA DE LA SEÑAL DE NAVEGACION.

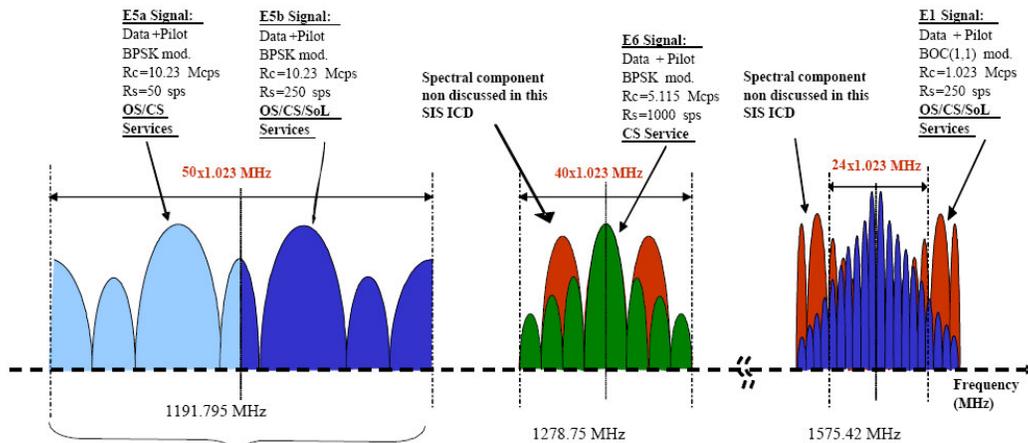


Figura 29. Espectro de frecuencias de GALILEO.

El sistema Galileo transmite seis señales que conforman los distintos enlaces por los que prestará sus servicios.

Cada señal tiene unas determinadas características en cuanto a su estructura, a la modulación empleada y la tasa de datos. En la Figura 29 se muestra el espectro de cada una de las señales que se van a transmitir y la banda en que se ubican.

Las señales que transmite cada satélite son:

- **Señal E1:** es una señal de acceso abierto que comprende un canal dedicado a datos y otro a la portadora (L1-B y L1-C respectivamente). Se compone de códigos PRN y un mensaje de navegación (I/Nav) no encriptados a los que pueden acceder todos los usuarios. Contiene mensajes de integridad no encriptados, así como datos comerciales encriptados. Su tasa de datos es de

125 bps. La señal E1 ofrece los servicios: Servicio Abierto (OS, Open Service), Servicio Comercial (CS, Comercial Service) y Servicios de Salvamento (SoL, Safety of Life).

- **Señal LP1:** es una señal de acceso restringido que se transmite por el canal L1-A. Tanto los códigos PRN como el mensaje de navegación, que se conoce como G/Nav están encriptados y prestan servicios gubernamentales.

- **Señal E6:** es una señal de tipo comercial que posee dos canales, uno de datos y otro de portadora (E6-B, E6-C). Sus códigos de posicionamiento y el mensaje de navegación están encriptados mediante un algoritmo comercial. Su mensaje de navegación es el C/Nav. Su tasa de datos es de 500 bps. Se usa para CS.

- **Señal E6P:** es una señal de acceso restringido que se transmite por el canal E6-A. Sus códigos PRN y el mensaje de navegación están encriptados mediante un algoritmo gubernamental. El mensaje de navegación es del tipo G/Nav.

- **Señal E5a:** es la señal de servicio abierto que se ofrece por la banda E5 e incluye los canales de información y portadora (E5b-I y E5b-Q). Sus códigos de posicionamiento y su mensaje de navegación (F/Nav) no están encriptados. Provee de información básica de apoyo a la función de navegación y función de tiempo. Se usa para OS y su tasa es de 25 bps.

- **Señal E5b:** es una señal de acceso abierto que comprende un canal dedicado a datos y otro a la portadora (E5b-I y E5b-Q respectivamente). Se compone de códigos PRN no encriptados y un mensaje (I/Nav) de navegación a los que pueden acceder todos los usuarios. Contiene mensajes de integridad no encriptado y datos comerciales encriptados. Ofrece CS, OS y servicio SoL.

Cada enlace emplea un tipo de modulación distinta. En función del tipo de modulación la tasa de chips variará:

- Las bandas E5a y E5b se procesan como un solo ancho de banda. Las señales de E5 se transmiten usando la técnica AltBOC(15,10) con tasa de chips  $10 * f_0 = 10.23 \text{ Mcps}$ .

- Para E6 se utiliza la técnica BPSK (ver Apéndice A2) con una tasa de chips de  $5 * f_0 = 5.115 \text{ Mcps}$ .

- Para E1 la técnica BOC (ver Apéndice A2) con tasa  $f_0 = 1.023 \text{ Mcps}$ .

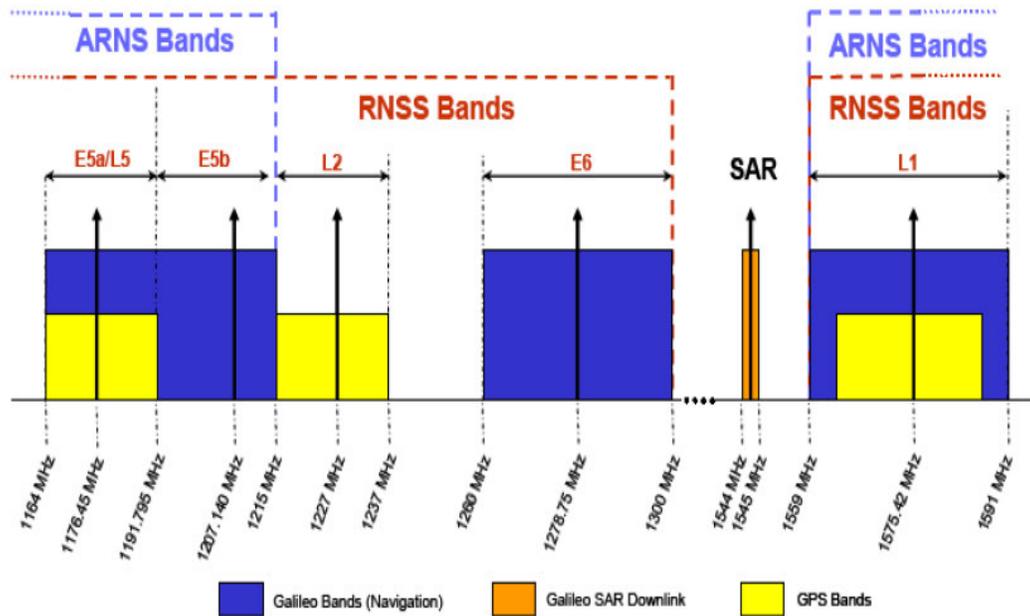


Figura 30. Plan de frecuencias GALILEO.

La distribución de frecuencias del sistema Galileo (Figura 30) se ha realizado como se ha visto antes en tres bandas (cuatro si consideramos E5a y E5b por separado). Todas comparten el espectro con los otros dos RNSS, GPS y GLONNAS, mientras que dos de ellas, E5 y L1 comparten el espectro con los servicios ARNS usados en aviación civil, lo que permite el uso de Galileo para aplicaciones de seguridad críticas.

La frecuencia central de cada enlace así como el ancho de banda en recepción se define en la Tabla 3.7. Todos los anchos de banda así como las frecuencias de portadora se han diseñado como múltiplos de  $f_0 = 1.023\text{MHz}$ .

El reloj de Galileo trabaja a 10.23 MHz mediante divisores en frecuencia es capaz de trabajar a distintas frecuencias generando así los códigos PRN. Dependiendo del código PRN variará el ancho de banda de la señal.

Señal	Frecuencia central	Ancho de banda
E5	1191.795 MHz ( $1165 f_0$ )	51.150 MHz ( $50 f_0$ )
E6	1278.75 MHz ( $1250 f_0$ )	40.920 MHz ( $40 f_0$ )
E1	1575.42 MHz ( $1540 f_0$ )	24.552 MHz ( $24 f_0$ )

Tabla 3.7. Ancho de banda de recepción de señales GALILEO.

## CAPITULO 3. MATEMATICA DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITES.

### 3.1 MATEMATICA DE LOS SATELITES.

El Anexo1 muestra el proceso por medio del cual el tiempo de retardo de las señales transmitidas por el satélite y las recibidas por los receptores. Involucra el análisis de el mensaje de navegación y la forma en que es utilizado para calcular la posición del receptor.

Los sistemas GNSS combinan sofisticadas tecnologías de radio y satélites para proporcionar receptores de navegación con señales de radio que indican entre otras cosas el momento de la transmisión y la identidad del satélite transmisor. El cálculo de la posición de estas señales requiere operaciones matemáticas que se explican en esta sección.

Para que un receptor GNSS determine su posición, debe recibir señales de tiempo de cuatro satélites por separado (Sat 1 ... Sat 4), con el fin de calcular los tiempos de viaje de la señal  $\Delta t_1$  ...  $\Delta t_4$  tal como se muestra en el esquema de la Figura 31.

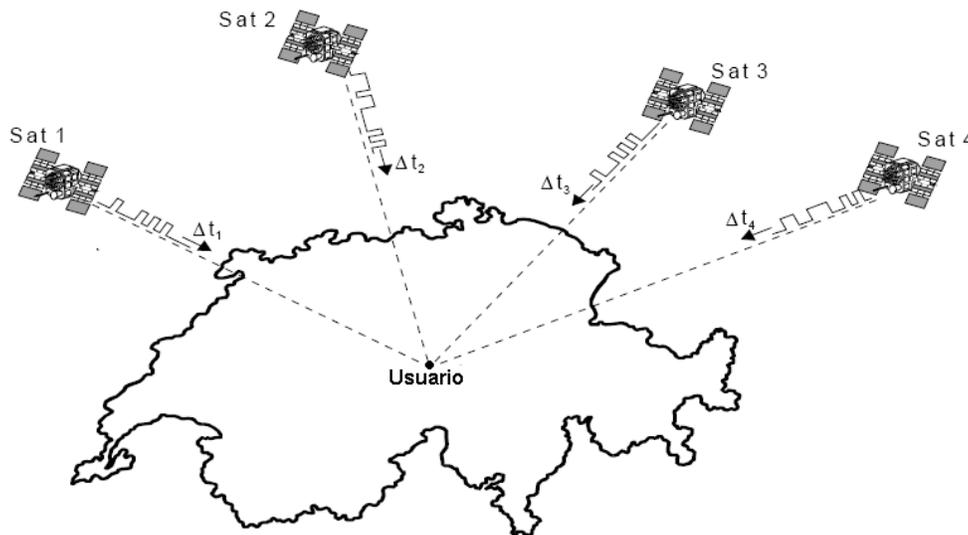


Figura 31. Señales de 4 satélites diferentes son necesarias para el cálculo de posición de los receptores GNSS.

Los cálculos se efectúan en un sistema cartesiano de tres dimensiones con un origen geocéntrico tal como es ilustrado en la Figura 32. La distancia que existe desde el usuario a cada uno de los cuatro satélites es denominada  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  y pueden ser determinados con la ayuda de los tiempos de viaje de cada una de las señales denominados  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  y  $\Delta t_4$  que existen entre los cuatro satélites y el usuario. Las posiciones de los satélites son conocidas por medio de las efemérides como se estudio en el Capítulo 3.  $X_{SAT}$ ,  $Y_{SAT}$  y  $Z_{SAT}$  de los cuatro satélites son conocidas y las coordenadas de usuario pueden ser calculadas.

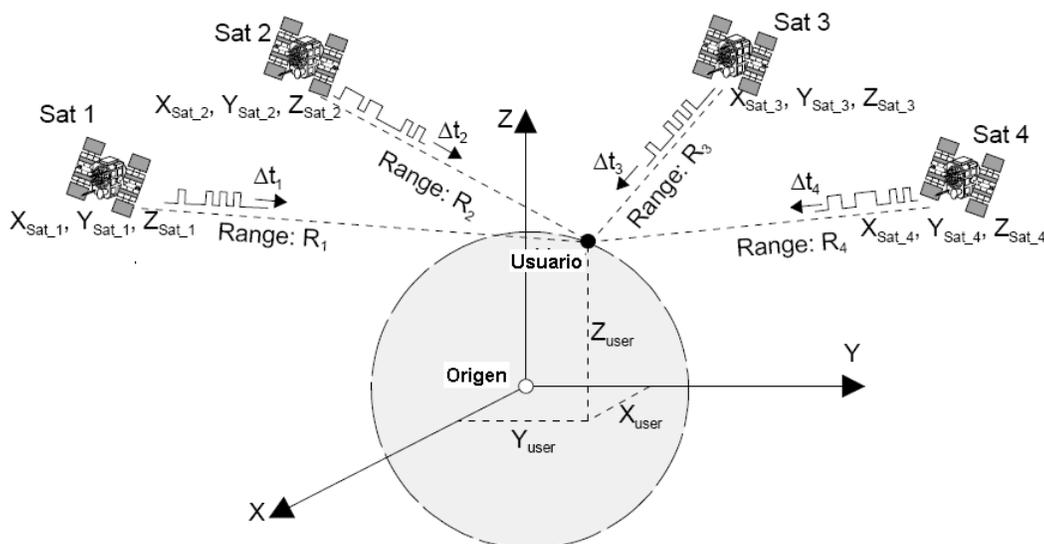


Figura 32. Sistema de coordenadas tridimensional sobre el que se efectúa el análisis.

Debido a los relojes atómicos a bordo de los satélites, el tiempo en el cual se transmite la señal del satélite se conoce de forma muy precisa.

Todos los relojes de los satélites se ajustan o sincronizados entre sí y la hora UTC. En contraste, el reloj del receptor no está sincronizado con UTC y es por lo tanto lento o rápido por  $\Delta t_0$ . El signo de  $\Delta t_0$  es positivo cuando el reloj de usuario es rápido. El error de tiempo resultante  $\Delta t_0$  causa inexactitudes en la medición del tiempo de viaje de la señal y la distancia  $R$ . Como resultado, una distancia incorrecta es medida que se conoce como pseudodistancia o PSR [34].

$$\Delta t_{\text{medido}} = \Delta t + \Delta t_0 \quad (1a)$$

$$PSR = \Delta t_{\text{medido}} \cdot c = (\Delta t + \Delta t_0) \cdot c \quad (2a)$$

$$PSR = R + \Delta t_0 \cdot c \quad (3a)$$

$R$ : distancia verdadera entre el satélite y el usuario.

$c$ : velocidad de la luz.

$\Delta t$ : tiempo de viaje de la señal desde el satélite hasta el usuario.

$\Delta t_0$ : diferencia de tiempo entre el reloj del satélite y el reloj del receptor.

PSR: pseudorange o pseudodistancia.

La distancia  $R$  desde el satélite hasta el usuario puede ser planteada en un sistema cartesiano tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$R = \sqrt{(X_{Sat} - X_{User})^2 + (Y_{Sat} - Y_{User})^2 + (Z_{Sat} - Z_{User})^2} \quad (4a)$$

Al sustituir la ecuación 4a en 3a se obtiene:

$$PSR = \sqrt{(X_{Sat} - X_{User})^2 + (Y_{Sat} - Y_{User})^2 + (Z_{Sat} - Z_{User})^2} + c \cdot \Delta t_0 \quad (5a)$$

Para determinar el valor de las 4 variables desconocidas en la ecuación ( $\Delta t_0$ ,  $X_{User}$ ,  $Y_{User}$  y  $Z_{User}$ ) son necesarias 4 ecuaciones independientes. La siguiente variable es valida para cuatro satélites: **i=1, 2, 3, 4.**

$$PSR_i = \sqrt{(X_{Sat_i} - X_{User})^2 + (Y_{Sat_i} - Y_{User})^2 + (Z_{Sat_i} - Z_{User})^2} + c \cdot \Delta t_0 \quad (6a)$$

Las cuatro ecuaciones resultantes de (6a) producen un grupo de ecuaciones no lineales. Para la linealizar las ecuaciones es utilizado el modelo de las serie de Taylor [39].

De la forma simplificada de las series de Taylor, se toma la primera parte de la ecuación:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \Delta x \quad (7a)$$

Con el fin de linealizar las cuatro ecuaciones (6a), un valor arbitrario  $X_0$  es estimado, por lo tanto deben ser incorporados en la cercanía del valor  $x$ . Esto significa que en lugar de calcular de forma directa los valores de  $X_{User}$ ,  $Y_{User}$  y  $Z_{User}$ , una posición estimada  $X_{total}$ ,  $Y_{total}$  y  $Z_{total}$  sera utilizada inicialmente. La Figura 33 muestra como las nuevas variables son introducidas en el esquema inicial de análisis.

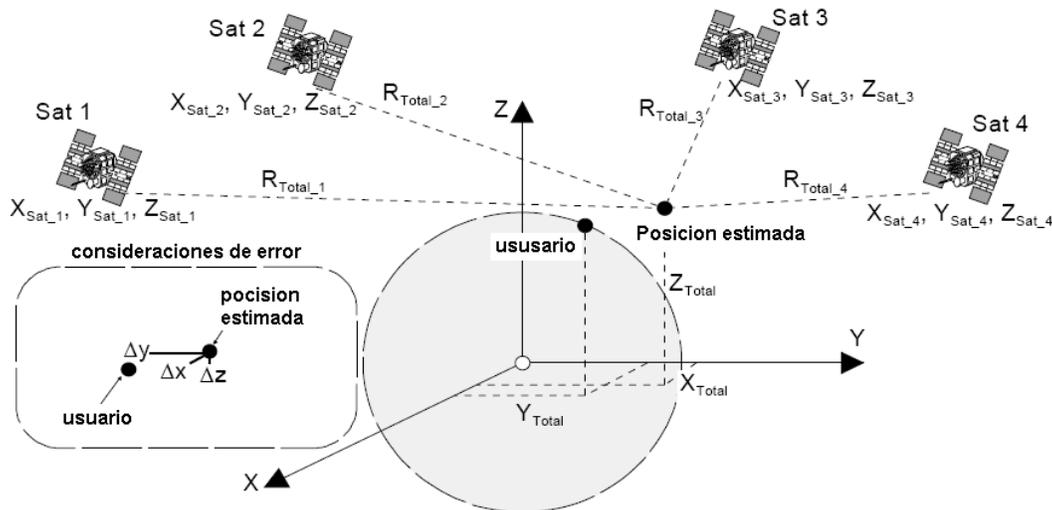


Figura 33. Ubicación de posición estimada.

La introducción de las nuevas variables que son las coordenadas de la posición estimada, producen nuevas variables denominadas  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$ .

$$\begin{aligned}
X_{\text{User}} &= X_{\text{Total}} + \Delta X \\
Y_{\text{User}} &= Y_{\text{Total}} + \Delta Y \\
Z_{\text{User}} &= Z_{\text{Total}} + \Delta Z
\end{aligned}
\quad (8a)$$

La distancia  $R_{\text{Total}}$  desde los satélites hacia la posición estimada puede ser calculada con la ecuación (4a):

$$R_{\text{Total}_i} = \sqrt{(X_{\text{Sat}_i} - X_{\text{Total}})^2 + (Y_{\text{Sat}_i} - Y_{\text{Total}})^2 + (Z_{\text{Sat}_i} - Z_{\text{Total}})^2} \quad (9a)$$

Combinando la ecuación (9a) con (6a) y (7a) se obtiene:

$$PSR_i = R_{\text{Total}_i} + \frac{\partial(R_{\text{Total}_i})}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial(R_{\text{Total}_i})}{\partial y} \cdot \Delta y + \frac{\partial(R_{\text{Total}_i})}{\partial z} \cdot \Delta z + c \cdot \Delta t_0 \quad (10a)$$

Después de llevar a cabo la diferenciación parcial, el resultado es el siguiente:

$$PSR_i = R_{\text{Total}_i} + \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta x + \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta y + \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_i}}{R_{\text{Total}_i}} \cdot \Delta z + c \cdot \Delta t_0 \quad (11a)$$

Después de la transposición de las cuatro ecuaciones derivadas de (11a) (para los valores de  $i = 1, 2, 3$  y  $4$ ), las cuatro variables ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  y  $\Delta t_0$ ) ahora pueden ser resueltos de acuerdo a las reglas del álgebra lineal:

$$\begin{bmatrix} PSR_1 - R_{\text{Total}_1} \\ PSR_2 - R_{\text{Total}_2} \\ PSR_3 - R_{\text{Total}_3} \\ PSR_4 - R_{\text{Total}_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta t_0 \end{bmatrix} \quad (12a)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_1}}{R_{\text{Total}_1}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_2}}{R_{\text{Total}_2}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_3}}{R_{\text{Total}_3}} & c \\ \frac{X_{\text{Total}} - X_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & \frac{Y_{\text{Total}} - Y_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & \frac{Z_{\text{Total}} - Z_{\text{Sat}_4}}{R_{\text{Total}_4}} & c \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} PSR_1 - R_{\text{Total}_1} \\ PSR_2 - R_{\text{Total}_2} \\ PSR_3 - R_{\text{Total}_3} \\ PSR_4 - R_{\text{Total}_4} \end{bmatrix} \quad (13a)$$

La solución de esta ecuación para las variables  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ , es utilizada para recalculer los valores estimados de  $X_{\text{total}}, Y_{\text{total}}$  y  $Z_{\text{total}}$  de acuerdo a (8a).

Los valores estimados  $X_{Total\_New}$ ,  $Y_{Total\_New}$  y  $Z_{Total\_New}$  y pueden ahora ser introducidos en el conjunto de ecuaciones (13a) con el normal proceso iterativo, hasta que los componentes de error  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  sean tan pequeños como el error deseado (por ejemplo, 0,1 m). Dependiendo de la estimación inicial, de tres a cinco cálculos iterativos se requieren generalmente para producir un componente de error de menor de 1cm.

El valor calculado de  $\Delta t_o$  corresponde al error del tiempo del receptor y se puede utilizar para ajustar el reloj del receptor.

Para ejemplificar el uso de estas ecuaciones, se ha realizado una simulación matemática de la resolución de estas ecuaciones por medio del programa Mathcad.

Los valores del punto real son conocidos. Los valores en coordenadas rectangulares del punto conocido son:  $X_{user}=95$ ,  $Y_{user}=100$ ,  $Z_{user}=130$ .

### 3.2 EJEMPLO DE CALCULO DE POSICION.

Para poder resolver la ecuación (13a) deben ser escogidas unas coordenadas iniciales para las iteraciones. Como se muestra en la Figura 34, se asigna valores cercanos a el punto real de interés. Los valores asignados como  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $Z_t$ , corresponden a los valores de  $X_{total}$ ,  $Y_{total}$  y  $Z_{total}$  de la ecuación (13a).

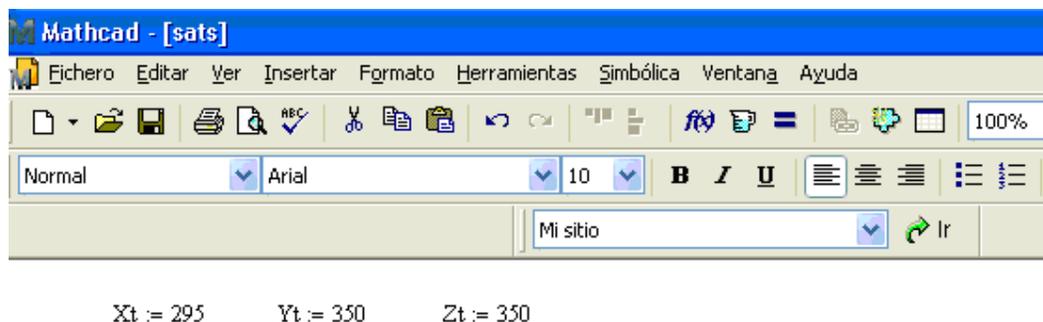


Figura 34. Valores iniciales para reolucion de ecuación (13a).

Luego se procede a asignar los valores reales de las coordenadas de los 4 satélites utilizados para la creación de este análisis.

En la Figura 35 se muestra la asignación de los valores de las coordenadas de los satelites. Las variables denominadas como  $X_s$ ,  $Y_s$  y  $Z_s$  corresponden a los valores de  $X_{sat}$ ,  $Y_{sat}$  y  $Z_{sat}$  de las variables de la ecuación (13a).

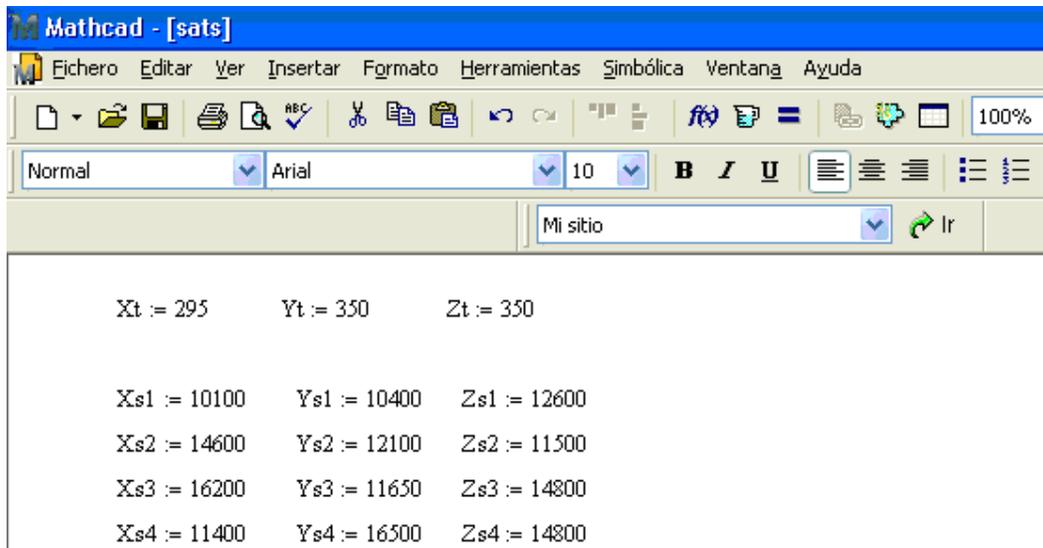


Figura 35. Coordenadas de satélites.

El siguiente paso será resolver la ecuación (4a) con los valores iniciales asumidos de  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $Z_t$ . La Figura 36 muestra la resolución de la ecuación (4a) para cada uno de los cuatro satélites asociados al punto asumido de las coordenadas del usuario. Los valores de  $R_t$  corresponden a los valores de  $R_{Total}$  de la ecuación (13a).

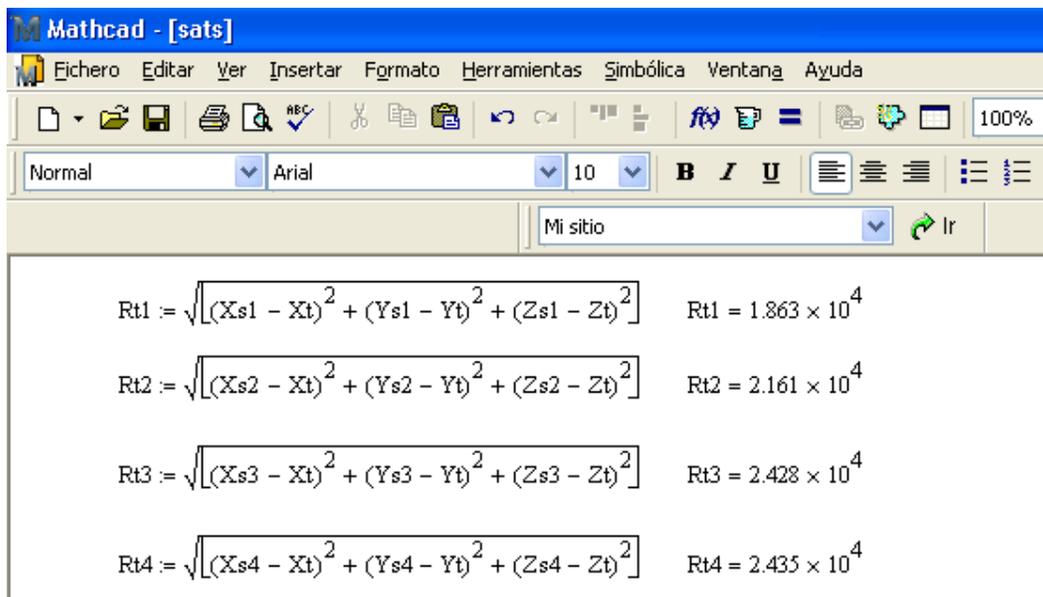


Figura 36. Solución de la ecuación (4a).

Luego se procede a la definición de las constantes correspondientes a el valor de la velocidad de la luz en el vacio  $c=300,00 \text{ Km/s}$  y  $dt=5\text{ms}$ . En la Figura 37 se muestra la resolución de los valores de la ecuación (6a) para encontrar los valores correspondientes a las variables PSR.

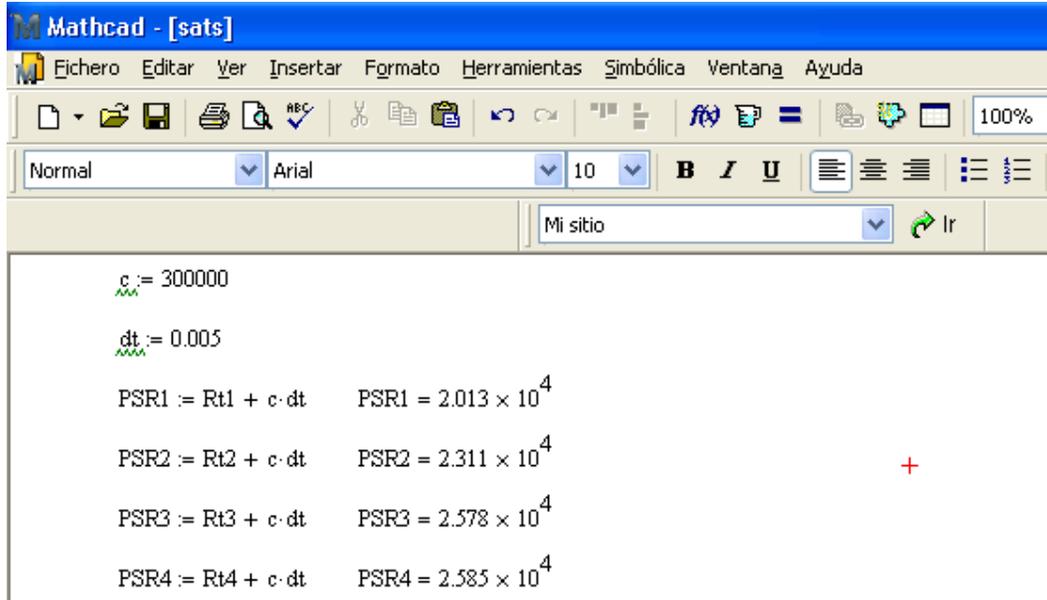


Figura 37. Solución de los valores de PSR de la ecuación (5a).

En la Figura 38 se muestra la definición de la ecuación (13a) para la obtención de los resultados.

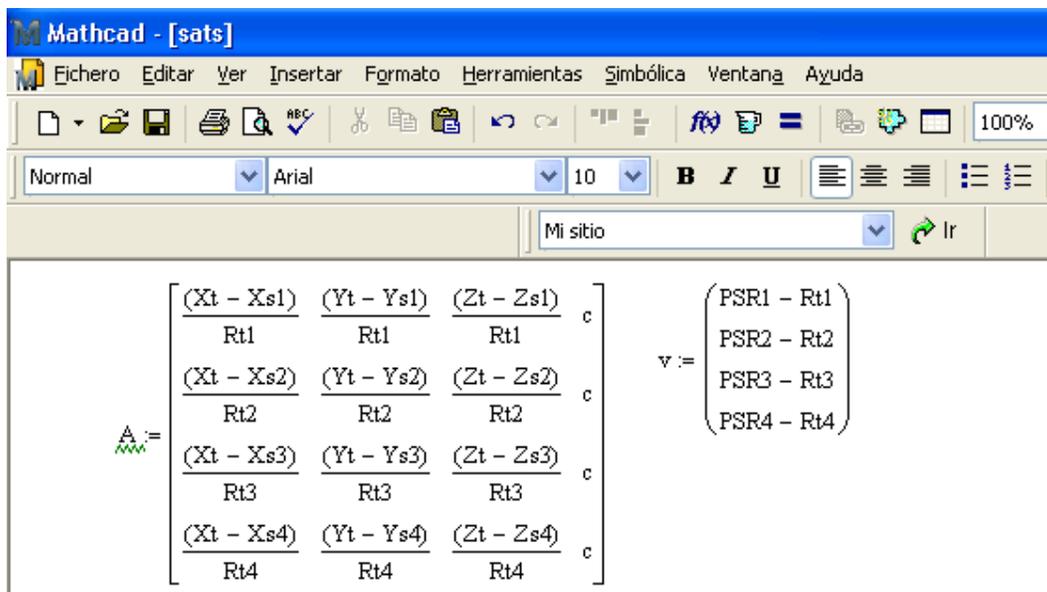


Figura 38. Definición de la Ecuación (13a).

En la Figura 39 se muestra una primera solución a los valores de  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  de la ecuación (13a).

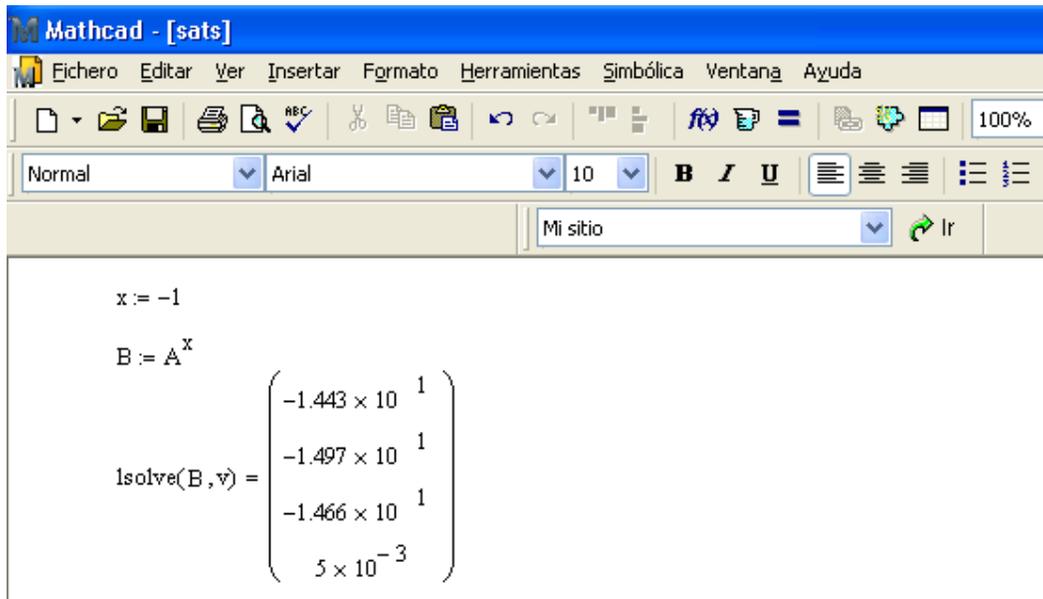


Figura 39. Solución de la Ecuación (13a).

En la Figura 40 se muestra la solución a los nuevos valores de la ecuación (8a). Como se puede apreciar, con las correcciones obtenidas luego de la solución de la ecuación (13a) los valores reales son cada vez más cercanos a los valores reales.

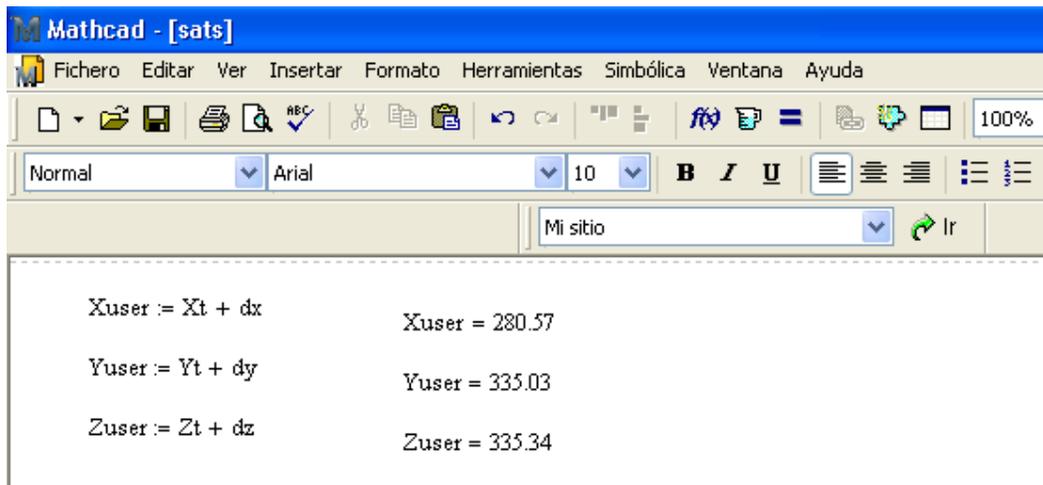


Figura 40. Solución a los valores de la ecuación (8a) luego de la primera iteración.

En la Figura 41 se muestra los resultados obtenidos para una sexta iteración de valores.

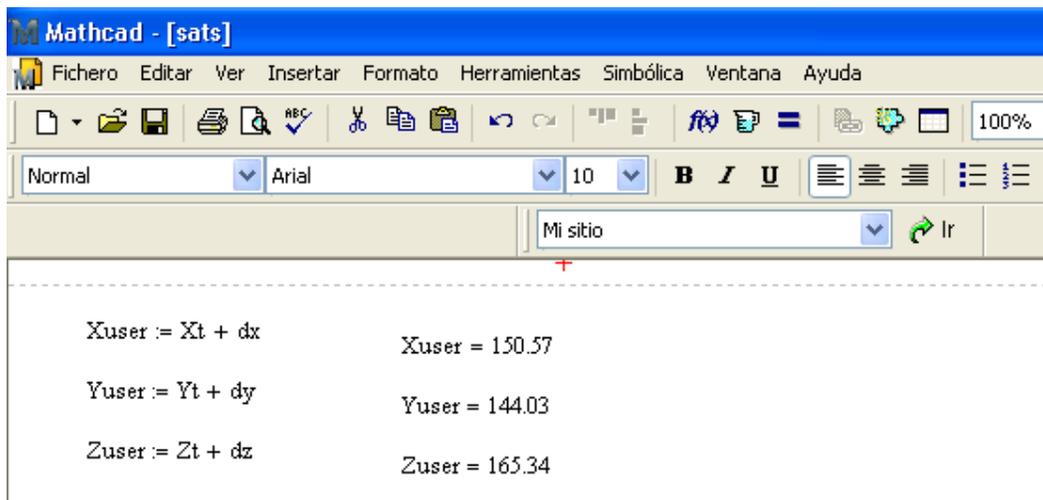


Figura 41. Resultados para una sexta iteración.

## **CAPITULO 4. SIMULACION.**

### **4.1 INTRODUCCION A LA SIMULACION.**

Las simulaciones de vuelo realizadas por medio del software, son rutas que utilizan radioayudas reales. Es decir que cada uno de los puntos utilizados para la construcción de las rutas de navegación son estaciones reales existentes y utilizadas para la navegación actual. El software a utilizar para las simulaciones es llamado AGI [40]. AGI es un software de Modelado de Misiones y Software de Análisis de Datos. AGI desarrolla modelos comerciales y software de análisis para estudios realizados en el espacio, orientado para comunidades como defensa e inteligencia. Utilizado por más de 40.000 ingenieros, operadores y analistas de todo el mundo, el software desarrollado por AGI evita el costo de la reinención, elimina y reduce los riesgos asociados con herramientas nuevas jamás puestas a prueba.

La versión a utilizar es una versión de prueba solamente. Esta versión posee limitantes en los análisis que se pueden llevar a cabo por el software, de esta forma, el análisis a realizar en la simulación estará sujeto a las condiciones que esta versión ofrece para la simulación.

El Apéndice E contiene una guía básica de usuario del software, por lo que es recomendado leer esta sección antes de leer la siguiente sección de este capítulo.

### **4.2 SIMULACION.**

El modulo a utilizar para la simulación es llamado STK. Este modulo es utilizado por ingenieros y los analistas para modelar sistemas complejos (aviones, satélites, vehículos de tierra), junto con sus sensores de comunicaciones, en un contexto del medio ambiente de la misión. A través de la visualización integrada, STK trae una comprensión clara del comportamiento del sistema y el rendimiento medido frente a los objetivos de una misión a modelar.

Los dos escenarios a mostrar serán utilizando las constelaciones de los satélites de NAVSTAR GPS y de GLONASS. La constelación de GALILEO no esta disponible en la versión de prueba con la que se realiza la simulación.

Se explicará paso a paso la construcción de los escenarios, los cuales incluirán cada uno 4 rutas de vuelo simuladas en los dos escenarios diferentes.

El primer paso a realizar será la construcción de las constelaciones de satélites a utilizar. Para ello debemos acceder al menú *Insert / New* para acceder a la ventana de objetos mostrada en la Figura 42.

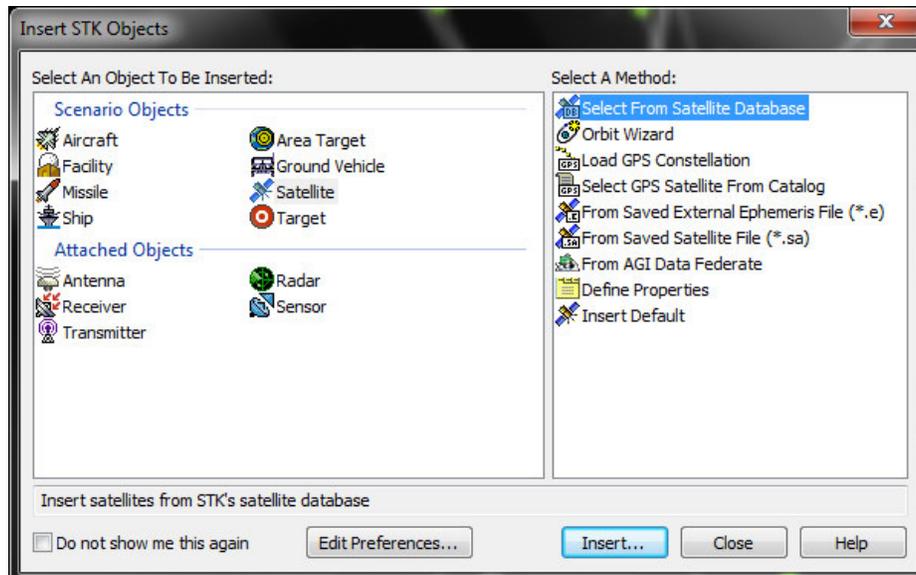


Figura 42. Ventana de Objetos.

En la ventana de objetos se debe seleccionar el objeto *Satellite*, y en el lado derecho al seleccionar el método, seleccionar la opción *Select from Satellite Database*.y luego dar click en la opción *Insert*.

La Figura 43 muestra la ventana por medio de la cual se tiene acceso a la búsqueda de los satélites a utilizar en la simulación. Para acceder a los satélites que deseamos, se de be escribir la palabra GLONASS en la opción *Common Name* de la búsqueda de objetos.

Una vez realizada la búsqueda deben de seleccionarse todos los elementos que comprenden la red de satélites enumerados para el tipo de búsqueda realizada y luego dar click en la opción *Insert*. Para agregar los satélites de la red NAVSTAR GPS, puede escribirse la palabra GPS o NAVSTAR e incluir los satélites numerados para esa opción.

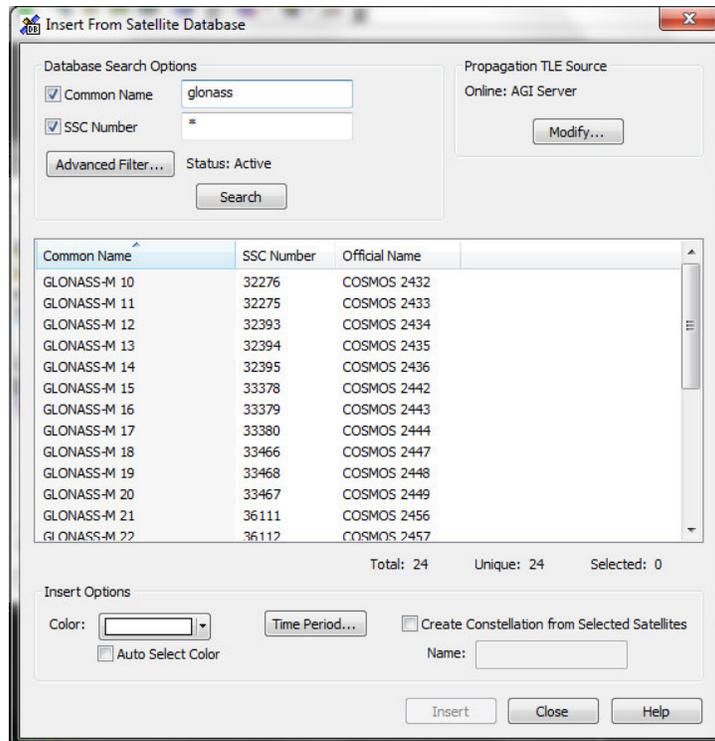


Figura 43. Ventana para la búsqueda de los satélites a utilizar.

La Figura 44 muestra la perspectiva en 2D y 3D del posicionamiento de los satélites en el área de trabajo. Cada uno se encuentra nombrado y numerado respectivamente con los nombres por defecto de la base de datos.

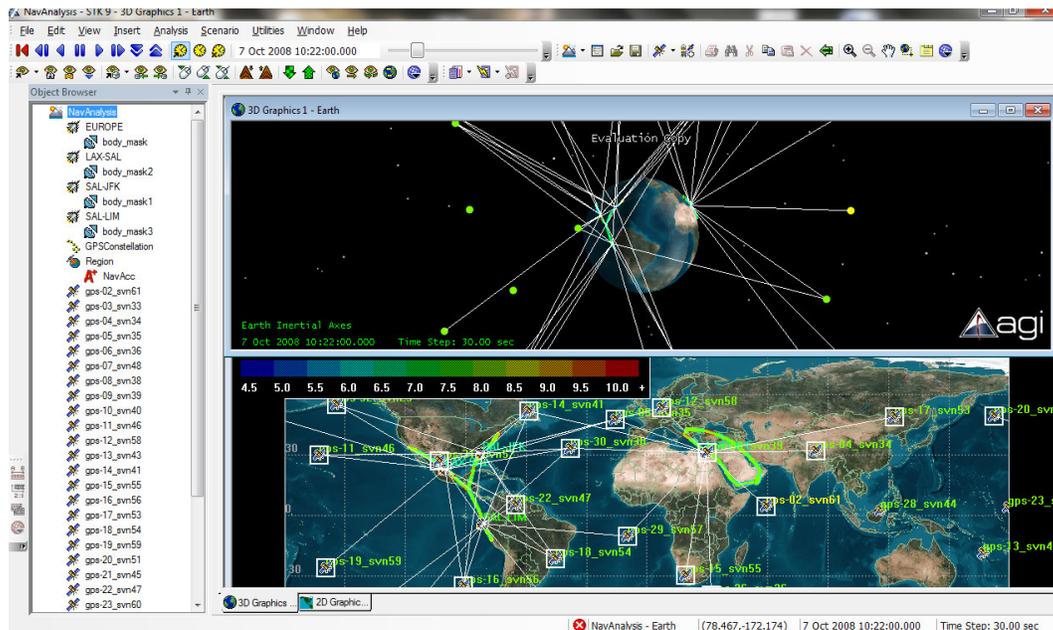


Figura 44. Perspectivas en 2D y 3D de las redes de satélites utilizadas.

El siguiente paso será incluir los aviones que se utilizarán para llevar a cabo el recorrido de las rutas. Para insertar un avión se realiza desde la ventana *Objects* que es mostrada en la Figura 42, seleccionando la opción *Aircraft* y seleccionando la opción *Insert*. El objeto insertado puede ser visualizado de cerca por medio de la opción *View From/To* y seleccionando el objeto desde el cual se desea se realice la vista, tal como lo muestra la imagen de la Figura 45.

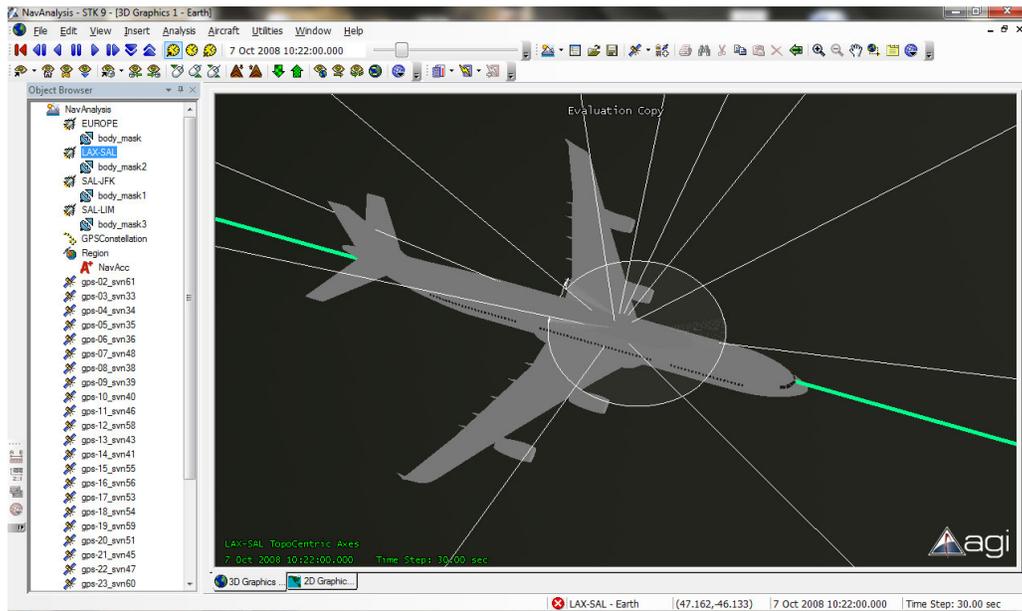


Figura 45. Vista central desde el objeto seleccionado.

El siguiente paso es asociar un sensor medidor de las señales que se recibirán de los diferentes satélites, por medio de los cuales se generará un enlace y un reporte después analizado en la sección de Resultados de la simulación.

Para asociar un sensor a cada uno de los aviones generados, se debe posicionar sobre el avión a considerar y en la opción de *Insert/New* y en la ventana de *Objects*, posicionarse sobre el objeto *Sensor* de la sección de *Attach Object* como se muestra en la Figura 42. Un nuevo objeto aparecerá asociado al avión en la parte izquierda de la pantalla en el área de *Object Browser* así como se muestra en la Figura 46.

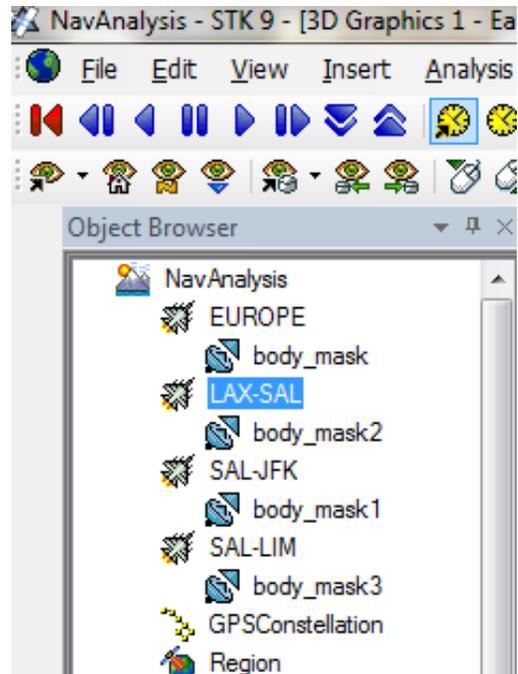


Figura 46. Objetos *body\_mask* asociados a los aviones.

Los sensores asociados a cada uno de los aviones aparecen con el nombre de *body\_mask*.

Se necesita asociar los sensores creados para los aviones a cada uno de los satélites de los cuales se requiere que se obtenga un parámetro de análisis. Para realizar esta función, debe darse click derecho en cada uno de los satélites y seleccionar la opción *Access*.

Luego en la ventana desplegada de la opción *Access*, en el área de *Associated Objects*, debe de seleccionarse todos los satélites de la constelación incluidos en el escenario, tal y como lo muestra en la Figura 47.

Luego de seleccionar todos los satélites, se hace click en el botón *Compute*, y en este momento todos los satélites han sido asociados al sensor del avión.

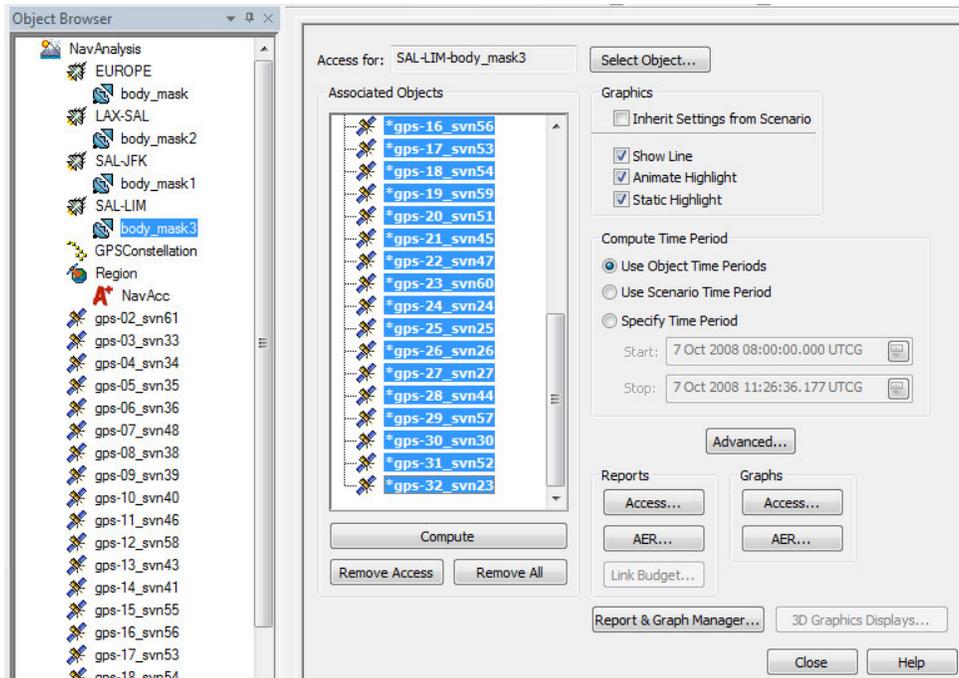


Figura 47. Ventana de Access para asociar los satélites al sensor del avión.

Este proceso debe realizarse para los tres aviones creados y sus respectivos sensores.

En la Figura 48 se observa como una línea blanca aparece entre el satélite y el avión en el momento en que estos dos tienen comunicación entre si.

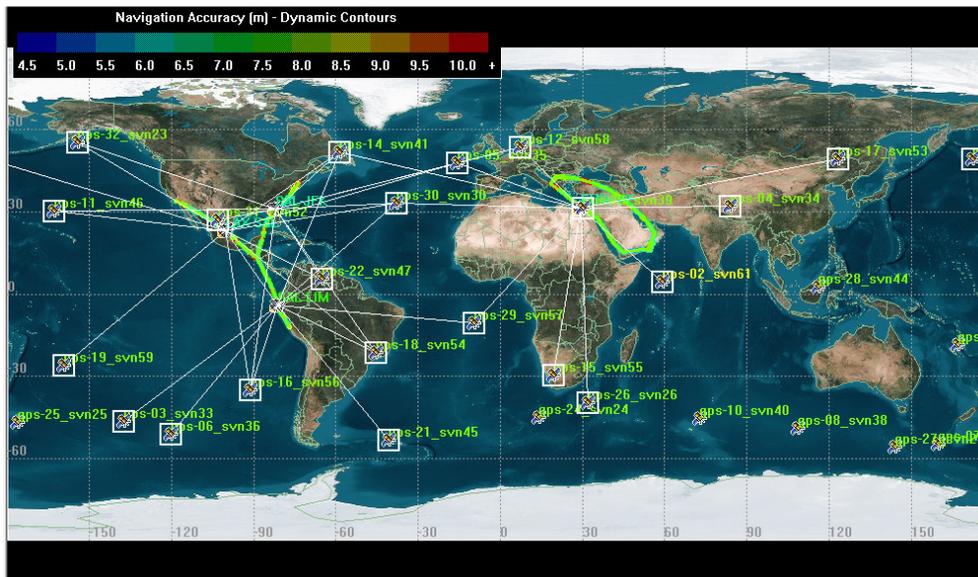


Figura 48. Las líneas blancas simbolizan que existe comunicación entre los dispositivos.

El siguiente paso es la creación de las rutas que cada uno de los aviones seguirán. Las rutas creadas en el área de América son tres, las cuales unen puntos entre los aeropuertos listados a continuación:

1. Los Angeles International Airport (EE.UU) – Aeropuerto Internacional de El Salvador (El Salvador).
2. Aeropuerto Internacional de El Salvador (El Salvador) – John F. Kennedy International Airport (EE.UU).
3. Aeropuerto Internacional de El Salvador (El Salvador) – Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Perú).

Para obtener las rutas entre estos destinos, se tomo la información de los puntos a recorrer por medio de archivos de vuelo de una compañía aérea que utiliza un programa de creación de planes de vuelo computarizados. Cada uno de estos puntos consta de una coordenada específica y el plan de vuelo ofrece un valor de altitud sobre ese punto del terreno.

La primer columna muestra el nombre o denominador OACI para un punto en específico.

La segunda y tercer columna muestran los datos de Longitud y Latitud respectivamente. Estos puntos serán utilizados para la creación de las rutas en el programa.

La lista de los puntos utilizados para la creación de las rutas son mostradas en la siguiente Tabla 4.1.

El Salvador - New York			Los Angeles - El Salvador			El Salvador - Lima		
MSLP	N13 26.5	W089 03.3	KLAX	N33 56.5	W118 24.5	MSLP	N13 26.5	W089 03.3
LAN	N13 24.7	W089 08.3	SLI	N33 47.0	W118 03.3	SEDRO	N13 09.2	W088 48.1
YSV	N13 41.7	W089 07.0	PDZ	N33 55.1	W117 31.8	UZ30	N12 46.4	W088 36.3
SULMA	N13 57.2	W088 45.8	JLI	N33 08.4	W116 35.2	DORLA	N11 59.1	W088 11.9
NAGEL	N14 15.8	W088 35.4	TOC	N32 41.5	W115 43.7	TOC	N10 06.5	W087 14.5
TOC	N16 20.1	W087 04.8	ASUTA	N32 39.2	W115 39.2	SETRI	N07 45.8	W086 03.9
AMIDA	N18 34.7	W087 21.0	J93	N32 20.3	W115 03.8	LIXAS	N01 25.0	W082 56.2
OMBET	N20 06.8	W087 00.7	J93	N31 22.0	W113 18.1	EKEDA	S00 10.3	W082 26.7
CZM	N20 31.3	W086 55.8	OTEXA	N28 40.5	W108 30.0	ATENO	S02 03.0	W081 52.2
PAMUL	N20 46.4	W086 53.7	TOC	N28 27.7	W108 08.5	ARNEL	S03 24.0	W081 35.0
CUN	N21 01.5	W086 51.5	CDR	N24 09.6	W101 29.2	TAL	S04 34.8	W081 15.2
SAMED	N21 25.7	W086 45.0	IREKO	N23 29.0	W100 38.8	OKASO	S05 08.7	W080 58.2
ROBIN	N22 24.0	W086 29.0	NAU	N20 11.5	W096 44.7	KIBAN	S06 53.6	W080 05.4
MYDIA	N24 02.4	W086 09.5	AXORO	N19 31.0	W096 23.2	TRU	S08 05.2	W079 06.7
EPSON	N26 01.8	W085 22.8	VER	N19 08.6	W096 11.3	BTE	S09 08.9	W078 31.3
CULLY	N26 23.0	W085 14.2	IPTAK	N18 54.6	W095 49.5	ATOGO	S10 11.8	W078 00.6
CIGAR	N27 29.6	W084 47.0	DUPLO	N18 33.3	W095 16.6	STR	S10 15.0	W077 59.0
KNOST	N28 00.0	W083 25.4	MTT	N18 06.2	W094 34.9	GALGO	S11 10.	W077 31.7
TOC	N28 18.2	W083 19.2	URVOD	N16 52.3	W093 19.9	SIGAS	S11 47.6	W077 13.4

TAY	N30 30.3	W082 33.2	TGZ	N16 34.2	W093 01.8	SPIM	S12 01.3	W077 06.9
DCT	N32 53.7	W080 02.3	ONGOR	N16 18.5	W092 41.6			
JMACK	N33 59.3	W078 58.0	ERBOR	N15 41.7	W091 57.3			
BARTL	N34 18.2	W078 39.1	KALPA	N15 01.3	W091 04.5			
ISO	N35 22.3	W077 33.5	AUR	N14 35.8	W090 31.9			
WEAVR	N35 51.2	W077 08.1	TOD	N14 17.3	W090 22.9			
ORF	N36 53.5	W076 12.0	DUNEL	N13 43.9	W090 06.5			
SAWED	N37 32.0	W075 51.5	CAT	N13 26.5	W089 02.9			
KALDA	N37 50.5	W075 37.6	MSLP	N13 26.5	W089 03.3			
SWL	N38 03.4	W075 27.8						
RADDS	N38 38.9	W075 05.3						
SIE	N39 05.7	W074 48.0						
BOTON	N39 24.9	W074 27.3						
HOGGS	N39 35.0	W074 16.2						
PANZE	N39 40.6	W074 10.1						
KARRS	N39 50.5	W073 59.2						
CAMRN	N40 01.0	W073 51.7						
TOD	N40 06.4	W073 51.0						
KJFK	N40 38.4	W073 46.7						

Tabla 4.1 Listado de coordenadas para la creación de las rutas.

La introducción de los puntos a seguir por los aviones para formar las rutas, se deben de ingresar de forma individual para cada uno de los aviones. Para ingresar la ruta, se debe dar doble click en cada uno de los aviones. En la opción *Basic/Route*, se debe de seleccionar en la el menú desplegable *Propagator* la opción *Mision Modeler*, tal y como es mostrado en la Figura 52.

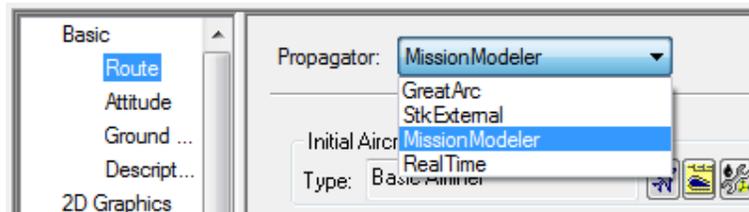


Figura 52. Acceso al menú para introducción de ruta.

Luego se debe de seleccionar la opción *Insert Procedure After Phase / Procedure* tal y como se ilustra en la Figura 53.

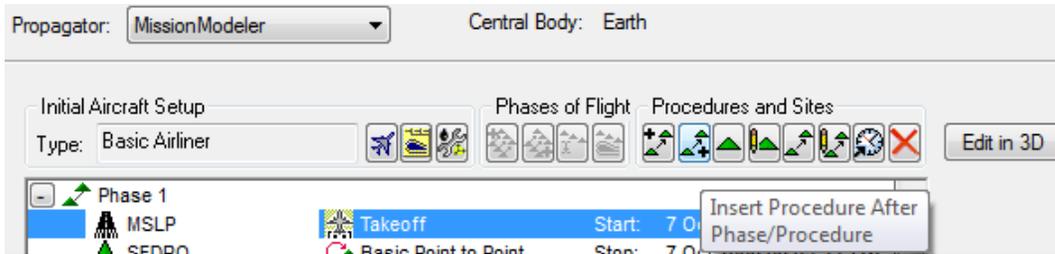


Figura 53. Función para la introducción de los puntos en ruta.

Luego se procede a introducir las coordenadas de los puntos, haciéndolo uno por uno tal y como aparece en la lista de puntos de las Figuras 49, 50 y 51. La figura 54 muestra los campos que deben de ser llenados para la correcta introducción de las coordenadas. En la opción de *Select Site type*, se debe de escoger entre un *Runway* o un *Waypoint* a introducir. Los *runways* son los primero y ultimo puntos de las listas de puntos en ruta, los demás puntos son *waypoints* que son los que forman los puntos en ruta. En la Figura 54 se muestra el ejemplo para la introducción de un punto denominado MSLP el cual corresponde al aeropuerto de El Salvador.

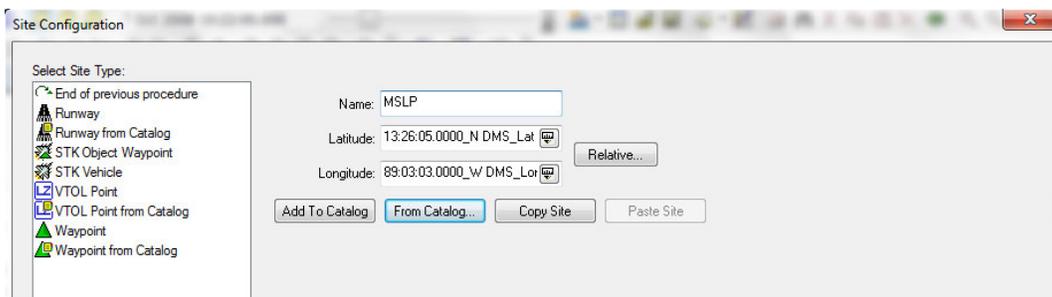


Figura 54. Introducción de coordenadas para runway MSLP.

La Figura 55 muestra como debe introducirse las coordenadas de un *waypoint* en ruta. El punto de la figura es llamado ATOGO.

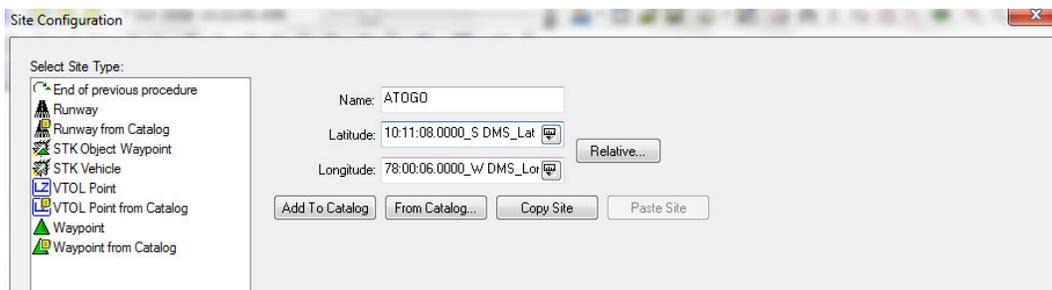


Figura 55. Punto sobre la ruta llamado ATOGO y sus respectivas coordenadas.

Para que la información del punto sobre la ruta este completo, se debe dar click en el botón siguiente e introducir el tipo de *waypoint* que se esta introduciendo. El tipo de *waypoint* es seleccionado de la parte izquierda del menú *Select Procedure Type*, tal y como se muestra en la Figura 56. Para que el punto a introducir este completo se debe introducir la altitud sobre la que el avión sobrepasara este punto desde la opción de *Altitude* que se muestra también en la Figura 56.

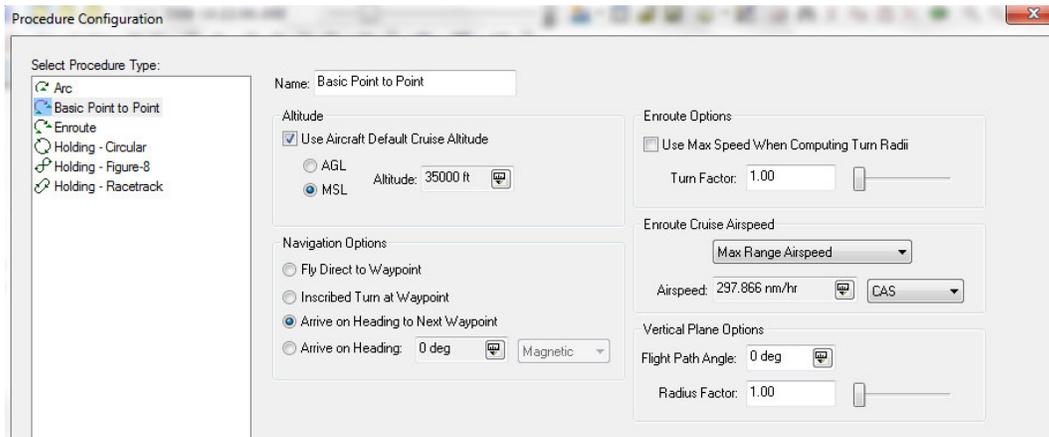


Figura 56. Selección del tipo de Waypoint y Altitud sobre cada uno de los puntos.

Luego de la introducción de todos los puntos sobre la ruta, se mostrara el perfil de vuelo del avión en su trayectoria, así como lo muestra la Figura 57.

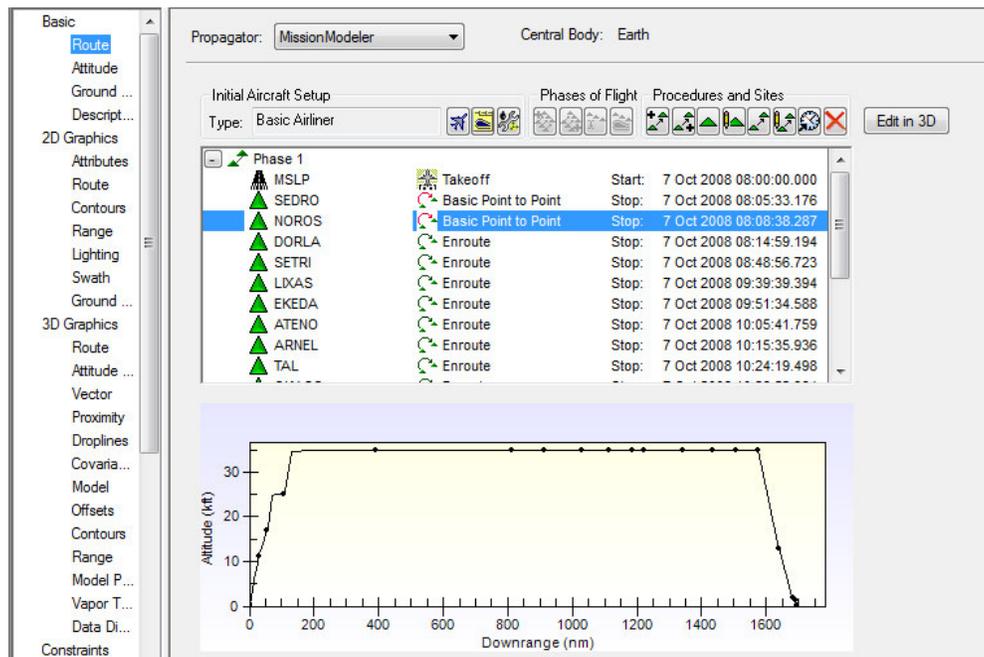


Figura 57. Lista de Waypoints y perfil de vuelo para la ruta El Salvador – Perú.

Finalmente, en la Figura 58 se puede apreciar la forma en que las rutas en forma de líneas de colores mayormente verdes son dibujadas sobre el mapa Terrestre.

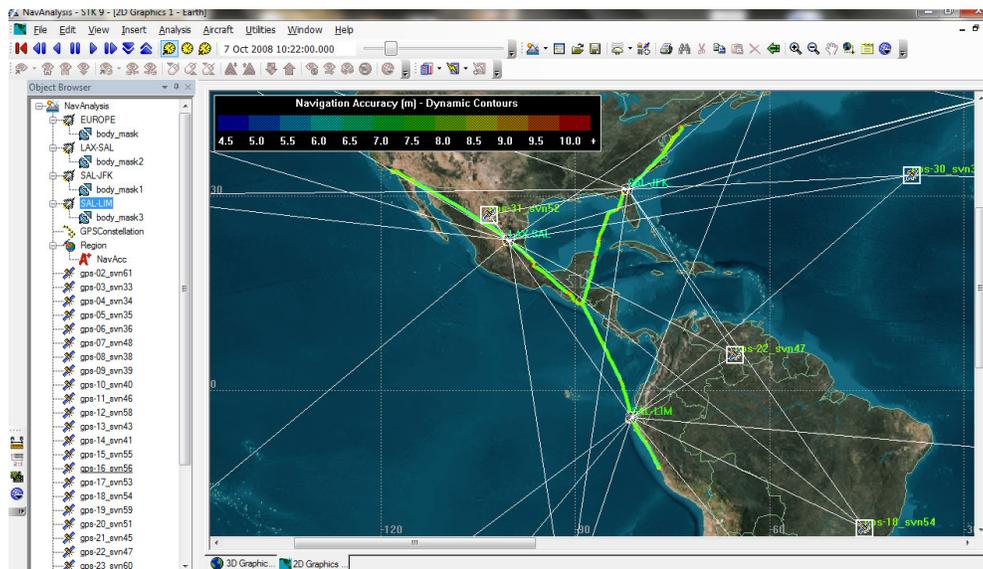


Figura 58. Definición de las rutas creadas desde una vista sobre el mapa.

A partir de todo el esquema planteado y con todos los datos listos para la simulación, el análisis de los resultados puede llevarse a cabo.

### 4.3 ANALISIS DE RESULTADOS.

Para llevar a cabo el análisis de resultados de la simulación, se mostrara los diferentes resultados analizados de forma paralela en ambos escenarios, tanto como para el escenario en que la constelación de satélites es la de NAVSTAR GPS y la constelación correspondiente a GLONASS.

Para efectos de la simulación las 3 rutas creadas para América denominadas por los nombres LAX-SAL (Los Angeles- El Salvador), SAL – JFK (El Salvador- New York) y SAL-LIM (El Salvador - Lima) estarán activas en distintas horas o periodos de la simulación.

El avión con ruta LAX-SAL comienza su recorrido a las 08:00:00 UTC, la ruta SAL-JFK lo hace a las 12:30:00 UTC y la ruta SAL-LIM lo hace a las 16:40:00 UTC.

En la primera parte del análisis de resultados de simulación se analizará la actividad del lado de los satélites. Se realizará el análisis de resultados para una serie de satélites tomado de cada una de las constelaciones que contienen los diferentes escenarios. Para el escenario con la red de satélites de NAVSTAR GPS se analizara la actividad del satélite numerado como gps-11, y para la red de satélites GLONASS se analizará la actividad del satélite GLONASS-M\_11.

El primer paso a realizar es crear un vínculo conexión para el análisis, entre los satélites escogidos y los 3 aviones que describen las diferentes rutas de la simulación. Para ello, debe hacerse click derecho sobre el satélite a vincular y seleccionar la opción *Access* del menú desplegable. Como se muestra en la Figura 59 se debe escoger los 4 sensores nombrados *body\_mask* de cada uno de los aviones.

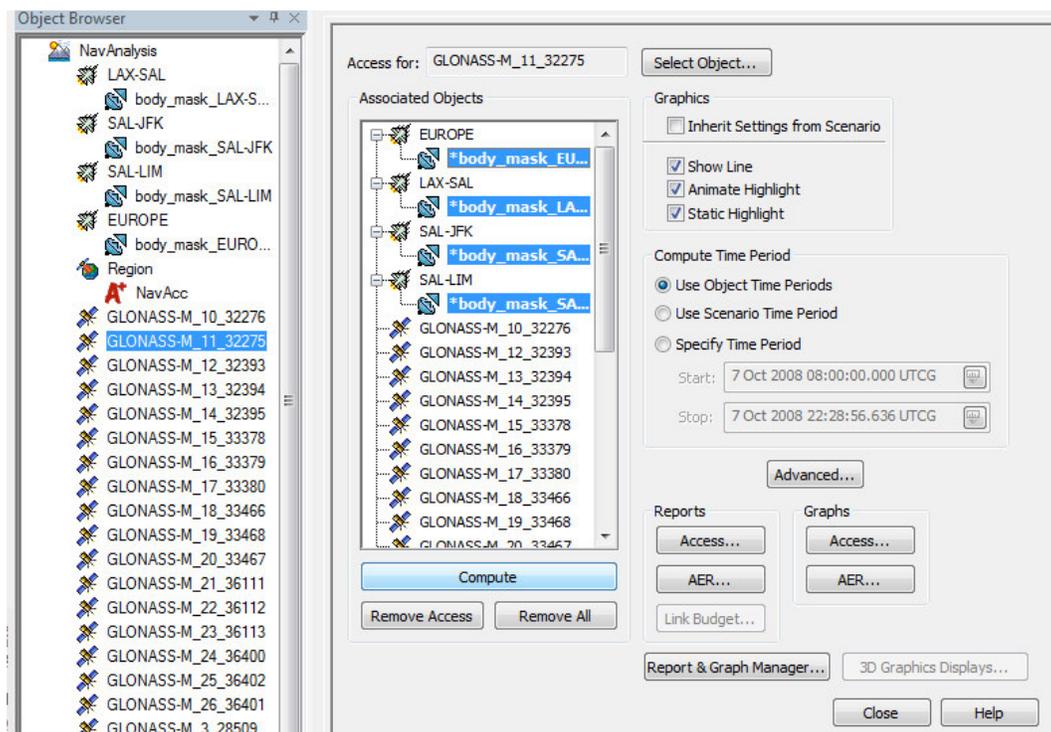


Figura 59. Vínculo creado entre satélite y cada uno de los aviones.

Este paso debe realizarse para cada uno de los satélites en los que se analizará la actividad en los diferentes escenarios.

El dato a analizar serán los accesos que los satélites tuvieron a lo largo de la simulación. Este análisis se puede generar en forma de reportes escritos y en forma gráfica.

Para la generación de estos reportes se debe acceder a la ventana de *Access* mostrada en la Figura 59. En la parte inferior de la pantalla están las diferentes opciones para la generación de reportes de Acceso, con la opción *Reports* se genera un reporte de tipo escrito y con la opción *Graphs* se genera un reporte de acceso gráfico.

El primero de los reportes a analizar será el reporte de acceso gráfico. En la Figura 60 se muestra el acceso entre el gps-11 y el avión con ruta LAX-SAL.

gps-11_svn46-To-body_mask_LAX-SAL			
Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
1	7 Oct 2008 08:00:00.000	7 Oct 2008 08:17:11.832	1031.832
2	7 Oct 2008 08:26:50.468	7 Oct 2008 12:16:57.877	13807.408

Global Statistics

Min Duration	1	7 Oct 2008 08:00:00.000	7 Oct 2008 08:17:11.832	1031.832
Max Duration	2	7 Oct 2008 08:26:50.468	7 Oct 2008 12:16:57.877	13807.408
Mean Duration	7419.620			
Total Duration	14839.240			

Figura 60. Reporte de acceso entre gps-11 y LAX- SAL.

En los reportes de acceso escrito, se muestra la duración de los intervalos de tiempo en los que el enlace se ha llevado a cabo. Los reportes muestran también los intervalos en que la comunicación se ha perdido y el tiempo en que se ha restablecido la conexión. Como estadísticas globales se muestran los el máximo intervalo de tiempo de conexión así como también el menor tiempo de acceso durante la comunicación del satélite con el avión.

gps-11_svn46-To-body_mask_SAL-JFK			
Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
1	7 Oct 2008 12:30:00.000	7 Oct 2008 13:11:07.108	2467.108
2	7 Oct 2008 16:03:56.329	7 Oct 2008 16:03:56.953	0.624
3	7 Oct 2008 16:09:17.924	7 Oct 2008 16:21:15.833	717.909

Global Statistics

Min Duration	2	7 Oct 2008 16:03:56.329	7 Oct 2008 16:03:56.953	0.624
Max Duration	1	7 Oct 2008 12:30:00.000	7 Oct 2008 13:11:07.108	2467.108
Mean Duration	1061.880			
Total Duration	3185.641			

Figura 61. Reorte de acceso entre gps-11 y SAL-JFK.

El reporte de acceso grafico de la actividad entre el gps-11 y las 3 rutas creadas se muestra en la Figura 62.

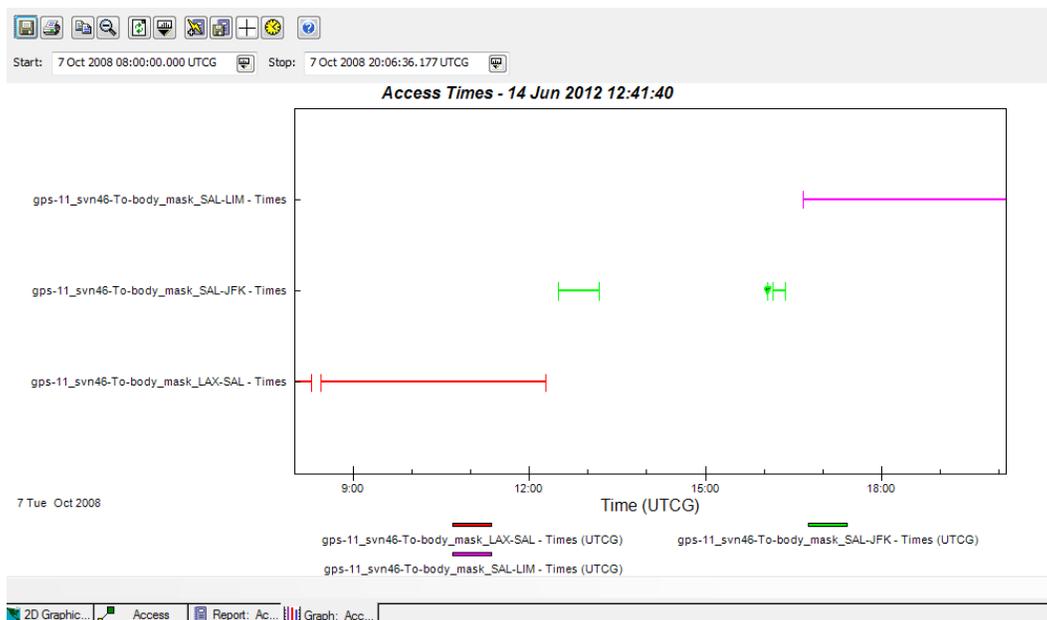


Figura 62. Reporte de acceso grafico entre gps-11 y LAX-SAL, SAL-LM y SAL-JFK.

Este tipo de reportes muestra por medio de un color distinto para diferenciar la actividad de cada una de las rutas. Como se aprecia en la Figura 62 con respecto a la línea de tiempo, el satélite muestra su actividad en intervalos en que solo se encuentra comunicado con un avión, momentos en que su posición no le permite tener comunicación con ninguna ruta y momentos en los que el satélite se encuentra comunicado con más de un avión.

Como se menciona en un principio, la primera parte de los resultados muestra la actividad mostrada por los satélites hacia los aviones.

La segunda parte de los resultados, los cuales se muestran a continuación, muestran los resultados de los accesos desde los aviones a los diferentes satélites. En otras palabras, esta parte del estudio muestra la actividad de los aviones con respecto a los satélites de los dos escenarios considerados en la simulación.

Tal y como la primera parte de la simulación, se mostrarán los reportes de acceso escritos y gráficos de los diferentes aviones en los diferentes escenarios.

La Figura 63 muestra la actividad entre el avión denominado SAL-JFK con el los diferentes satélites de la red GLONASS a las que esta ruta tuvo conexión durante el recorrido de la ruta.

SAL-JFK-To-GLONASS-M_10_32276				
-----				
No Access Found				
SAL-JFK-To-GLONASS-M_11_32275				
-----				
	Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
	-----	-----	-----	-----
	1	7 Oct 2008 15:10:23.602	7 Oct 2008 16:26:47.369	4583.766
Global Statistics				
-----				
Min Duration	1	7 Oct 2008 15:10:23.602	7 Oct 2008 16:26:47.369	4583.766
Max Duration	1	7 Oct 2008 15:10:23.602	7 Oct 2008 16:26:47.369	4583.766
Mean Duration			4583.766	
Total Duration			4583.766	
SAL-JFK-To-GLONASS-M_12_32393				
-----				
	Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
	-----	-----	-----	-----
	1	7 Oct 2008 12:30:00.000	7 Oct 2008 13:16:31.410	2791.410
Global Statistics				
-----				
Min Duration	1	7 Oct 2008 12:30:00.000	7 Oct 2008 13:16:31.410	2791.410
Max Duration	1	7 Oct 2008 12:30:00.000	7 Oct 2008 13:16:31.410	2791.410
Mean Duration			2791.410	
Total Duration			2791.410	
SAL-JFK-To-GLONASS-M_13_32394				
-----				
	Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
	-----	-----	-----	-----
	1	7 Oct 2008 15:31:58.388	7 Oct 2008 16:26:47.369	3288.981
Global Statistics				
-----				
Min Duration	1	7 Oct 2008 15:31:58.388	7 Oct 2008 16:26:47.369	3288.981
Max Duration	1	7 Oct 2008 15:31:58.388	7 Oct 2008 16:26:47.369	3288.981
Mean Duration			3288.981	
Total Duration			3288.981	
SAL-JFK-To-GLONASS-M_14_32395				
-----				
No Access Found				
SAL-JFK-To-GLONASS-M_15_33378				
-----				
	Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
	-----	-----	-----	-----

1	7 Oct 2008 12:58:29.550	7 Oct 2008 16:26:47.369	12497.819
Global Statistics			
-----			
Min Duration	1	7 Oct 2008 12:58:29.550	7 Oct 2008 16:26:47.369
Max Duration	1	7 Oct 2008 12:58:29.550	7 Oct 2008 16:26:47.369
Mean Duration			12497.819
Total Duration			12497.819
SAL-JFK-To-GLONASS-M_16_33379			
-----			
No Access Found			

Figura 63. Reportes de Acceso entre ruta SAL-JFK y satélites de red GLONASS.

Para efecto del documento, se mostrara solo un reporte escrito de una de las rutas con un grupo de los satélites escogidos al azar. Los reportes que contiene la actividad completa con todos los satélites, se encuentran en los documentos anexos al trabajo en la carpeta de reportes de accesos.

Los reportes de acceso escrito brindan información valiosa para el análisis de datos de navegación. Tal como se muestra en la Figura 63, se puede enumerar cuales de los satélites tienen actividad con una ruta a lo largo del recorrido del avión sobre su trayectoria.

De forma grafica, la lista de reportes de acceso a los satélites es mostrada en la Figura 64. Estos reportes muestran gráficamente los intervalos de tiempo de conexión entre los distintos satélites y la ruta a analizar.

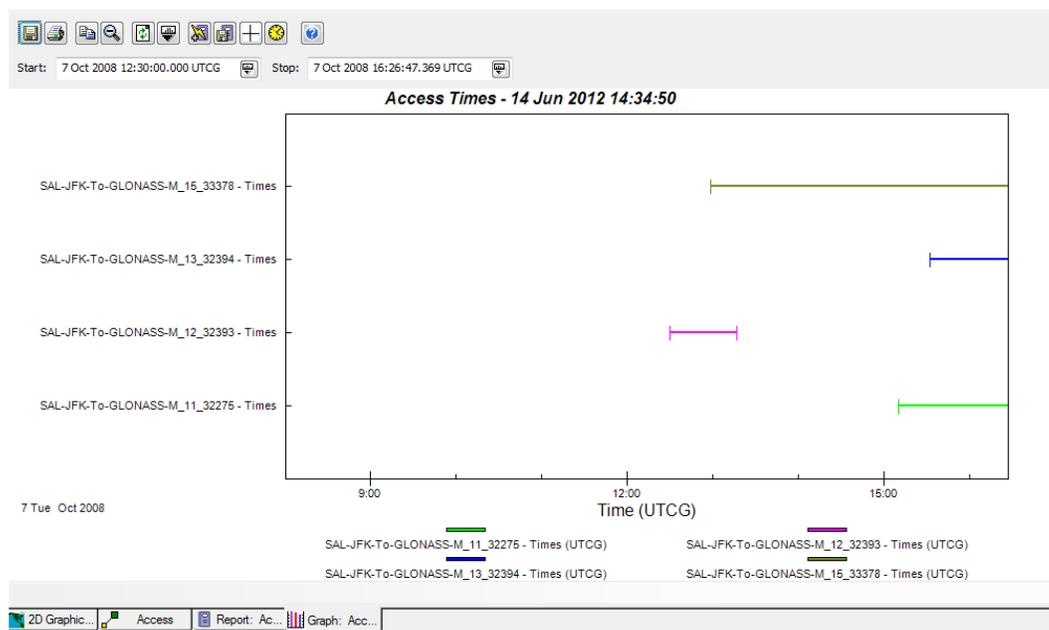


Figura 64. Reporte de acceso grafico entre ruta Sal-JFK y satelites GLONASS.

Por medio de los análisis de reportes de acceso que pueden obtenerse con la versión de prueba del software de AGI con su modulo STK, se ha podido corroborar el hecho de que al menos 4 satélites son visibles desde cualquier parte de mundo.

Para este trabajo la simulación fue realizada para áreas de America en distintas horas del día. El análisis que puede llevarse a cabo con una versión profesional del software puede llegar a ser mucho mas científico y exhaustivo, pero con las facilidades brindadas por la versión de prueba, los reportes de acceso son de gran utilidad en el análisis del comportamiento de las distintas constelaciones de satélites y su interacción con objetivos móviles como lo son los aviones, lo cual genera una aplicación de campos reales de investigación y en desarrollo.

## **CAPITULO 5.**

### **5.1 CONCLUSIONES.**

- Por medio de la revisión bibliográfica se obtiene un conocimiento y perspectiva mas amplios acerca de cómo los equipos de radionavegación actuales pueden llegar a ser reemplazados, partiendo del análisis del funcionamiento de cada uno de estos y llevando a cabo una visualización de cómo cada uno de estas funciones realizadas por sistemas de comunicaciones actuales serán reemplazadas por sistemas de navegación basados en posicionamiento global.
- De la investigación teórica se obtiene información importante en cuanto a como los fenómenos radioeléctricos empleados en las diferentes radioayudas hacen posible la transmisión y recepción de información en las diferentes etapas del proceso de la radionavegación.
- A través del estudio matemático de la forma en que se lleva a cabo el cálculo del posicionamiento de receptores se obtiene una base de análisis para las diferentes ramas de aplicación basadas en posicionamiento global.
- De igual forma, la importancia de conocer la forma en que los mensajes de los satélites esta constituida terminan de complementar el conocimiento necesario para comprender el proceso completo realizado en el sistema para obtener una posición por medio de receptores GNSS.
- La simulación brinda de una forma grafica una idea mas clara de la forma en que las diferentes constelaciones de satélites orbitan sobre la tierra y brindan una cobertura como se asegura de 4 satélites en cualquier parte del mundo en todo momento.
- Los reportes obtenidos por medio de la simulación brindan una herramienta de análisis para aplicaciones como planificación de rutas y análisis gráficos de conectividad entre aeronaves y satélites.

## 5.2 RECOMENDACIONES.

- Un análisis más exhaustivo y complejo puede ser llevado a cabo con la versión profesional del programa. El programa no solo se limita a simulación de aeronaves y satélites, sino todo tipo de navegación en desarrollo, además de realizar análisis de enlaces terrestres entre estaciones en tierra y satélites para el estudio de parámetros de ingeniería utilizados en el diseño de sistemas.
- Versiones educativas para grupos de computadoras como centros de computo de universidades son puestos a disposición por el proveedor. Esto brinda una oportunidad de utilizar este tipo de herramientas para cursos completos donde los análisis pueden llevarse a cabo al grado de complejidad que la herramienta lo permita.

## ANEXO.

La navegación por satélite es un método que utiliza al Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) para determinar con exactitud la posición y la hora en cualquier lugar de la Tierra. Los dispositivos receptores de señales de navegación por satélite son utilizados actualmente, tanto de particulares y empresas, para el posicionamiento, la localización, navegación, vigilancia, y determinar datos exactos que son implementados en una lista cada vez mayor de aplicaciones personales, de ocio y comerciales.

Utilizando un sistema GNSS, los siguientes valores pueden determinarse con precisión en cualquier parte del mundo:

1. La posición exacta (coordenadas longitud, latitud y altitud) una precisión de 20 metros hasta aproximadamente 1mm.
2. La hora exacta (Tiempo Universal Coordinado, UTC) una precisión de 60ns aprox. 5ns.

En aplicaciones de navegación, la velocidad y la dirección de una trayectoria se puede derivar de estos valores, que se obtienen de los satélites que orbitan la Tierra. La velocidad de desplazamiento también se puede determinar directamente por medio del efecto Doppler de las señales [41].

En este capítulo se mostrará el principio de operación de los elementos utilizados en la navegación basada en posicionamiento global. Los elementos mas importantes a estudiar son los satélites, los equipos receptores y las forma en que las señales transmitidas son procesadas para hacer posible la obtención de los parámetros necesarios para la navegación basada en posicionamiento global.

### TEORIA DEL FUNCIONAMIENTO.

El cálculo de la posición depende básicamente de dos parámetros que son la posición del satélite y el reloj del mismo. Dicha información es recogida en la señal enviada por el satélite hasta el receptor, siendo el proceso de cálculo el siguiente:

1. La situación de los satélites es conocida por el receptor con base en las efemérides, parámetros que son transmitidos por los propios satélites.
2. El receptor GNSS mide su distancia de los satélites, y usa esa información para calcular su posición. Esta distancia se mide calculando el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor. Conocido ese tiempo y basándose en el hecho de que la señal viaja a la velocidad de la luz (salvo algunas correcciones que se aplican), se puede calcular la distancia entre el receptor y el satélite.

3. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.

4. Son necesarios al menos cuatro satélites para obtener la posición, con tres satélites somos capaces de calcular la posición en tres dimensiones, mientras que el cuarto nos permite eliminar los errores de sincronismo.

Primero se analizará el movimiento sobre la órbita que realizan los satélites en el espacio, y las leyes que gobiernan dicho desplazamiento [42]. Luego se describe el proceso de transmisión y recepción de las señales, y el proceso de tratamiento de señales realizadas en el receptor para la obtención de datos destinados a la navegación. Por último, se estudian los factores que afectan el medio de transmisión utilizado y las formas para contrarrestar estos fenómenos.

El movimiento de los satélites en el espacio está determinada por las Leyes del Movimiento Planetario. Estas leyes fueron descritas por Johannes Kepler quien observó que el movimiento de los cuerpos en el espacio seguía 3 leyes matemáticas fundamentales conocidas como las leyes de Kepler<sup>6</sup>.

Los Sistemas de Navegación por Satélite emplean satélites que orbitan sobre la tierra y están distribuidos de tal forma que desde cualquier punto sobre la superficie hay contacto de línea-vista con al menos 4 satélites.

Cada uno de estos satélites está equipado con relojes atómicos a bordo. Los relojes atómicos son los instrumentos más precisos de medición de tiempo desarrollados, con pérdidas de un máximo de un segundo cada 30.000 a 1.000.000 de años. Con el fin de obtener más precisión, son regularmente ajustados o sincronizados desde distintos puntos de control en la Tierra. Estos puntos de control son las Estaciones de Control que forman parte del segmento de Control de los GNSS descritas en el capítulo 3.

Los satélites transmiten su posición exacta y la hora del reloj a bordo hacia la Tierra donde son recibidas en las Estaciones de Control y los equipos de usuarios finales. Estas señales se transmiten a la velocidad de la luz (300.000 km / s) y por lo tanto requieren aprox. 67.3ms para llegar a una posición sobre la superficie de la Tierra directamente debajo del satélite. Para establecer la posición, todo lo que se necesita es un receptor y un reloj de precisión.

Al comparar el tiempo de llegada de la señal del satélite con el reloj de tiempo a bordo del momento en que se transmite la señal, es posible determinar el tiempo de viaje de la señal. La Figura 65 presenta un tiempo inicial de transmisión desde el satélite y el receptor, y un tiempo final de recepción en ambos terminales.

---

<sup>6</sup> Ver Apéndice C.

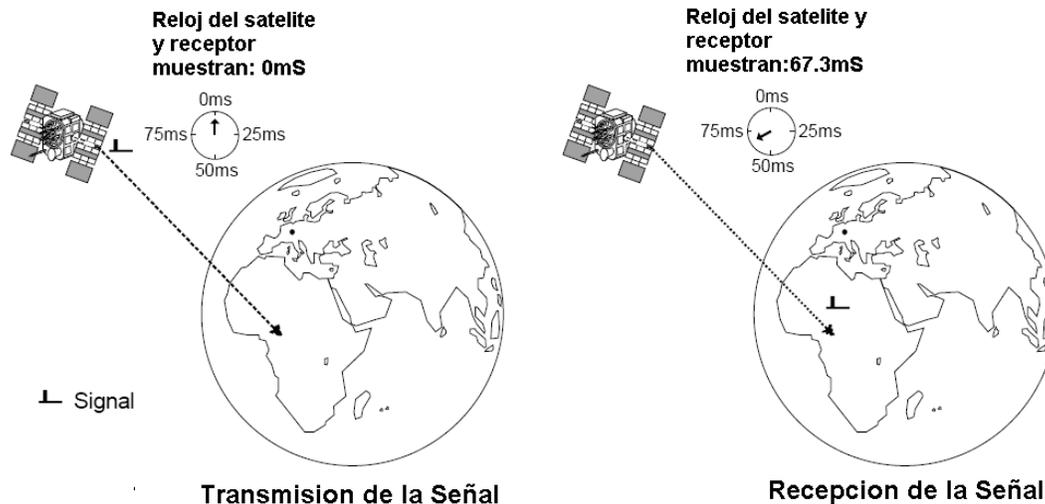


Figura 65. Medición del tiempo de viaje de la señal.

El tiempo es calculado tomando como parámetro que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es igual a la velocidad de la luz (300,000 Km/S) [43].

Para explicar la forma en que los tiempos de transmisión y recepción son calculados en el sistema, se utilizaran términos propios de la red NAVSTAR GPS para ejemplificar el proceso realizado en las distintas etapas. Para determinar el tiempo de viaje de la señal de los satélites a los receptores, los diferentes sistemas de tiempo son importantes:

UTC, Tiempo Universal Coordinado, utilizado para proveer una escala de tiempo basada en relojes atómicos y adaptada a la hora actual de la tierra.

Tiempo GPS, es la hora del sistema para el sistema de GPS. El tiempo GPS varía del UTC por un número entero de segundos (para el año 2008 la diferencia era de 14 segundos), además de una fracción de segundo menor que 1 $\mu$ s. La diferencia entre la hora GPS y UTC y las características actuales de esta diferencia se comunican en el mensaje de navegación (en la subtrama 4, página 18).

El tiempo de satélite, es el tiempo a bordo para cada uno de los satélites de forma individual. La diferencia específica entre el tiempo de satélite y el tiempo GPS se comunican en el mensaje de navegación.

Tiempo del receptor, se determina usualmente desde un oscilador de cuarzo interno y es diferente de tiempo GPS y / o UTC.

El tiempo de viaje de la señal, es usado para calcula la distancia o Recorrido (R) desde el satélite hasta el receptor. La figura 66 muestra la relación lineal que existe entre el tiempo de viaje de la señal y la distancia (R).

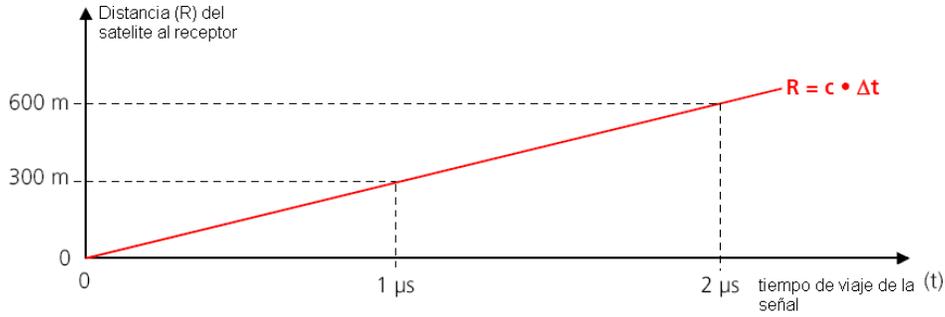


Figura 66. Determinación de la distancia (R) basado en el tiempo de viaje de la señal.

Para realizar este cálculo de la distancia, el proceso puede dividirse en tres fases:

**FASE 1. DETERMINACION DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LA SEÑAL UTILIZANDO CORRELACION.**

El receptor GNSS recibe las señales procedentes de uno o más satélites. Para cada una de las señales, una correlación tiene lugar. El procedimiento de correlación descrito aquí es de una sola señal, pero debe hacerse para cada señal de cada satélite. Puesto que el número (x) de satélites transmisores no se conoce por el receptor en el momento de recepción de la señal, este genera diversos códigos PRN (x = 1 ...32). Estos códigos se desplazan con respecto al tiempo hasta que un código PRN coincide con la máxima correlación de tiempo y forma de la señal de satélite de la señal x. La Figura 67 muestra como la máxima correlación es encontrada en la señal generada con un desplazamiento de tiempo t2).

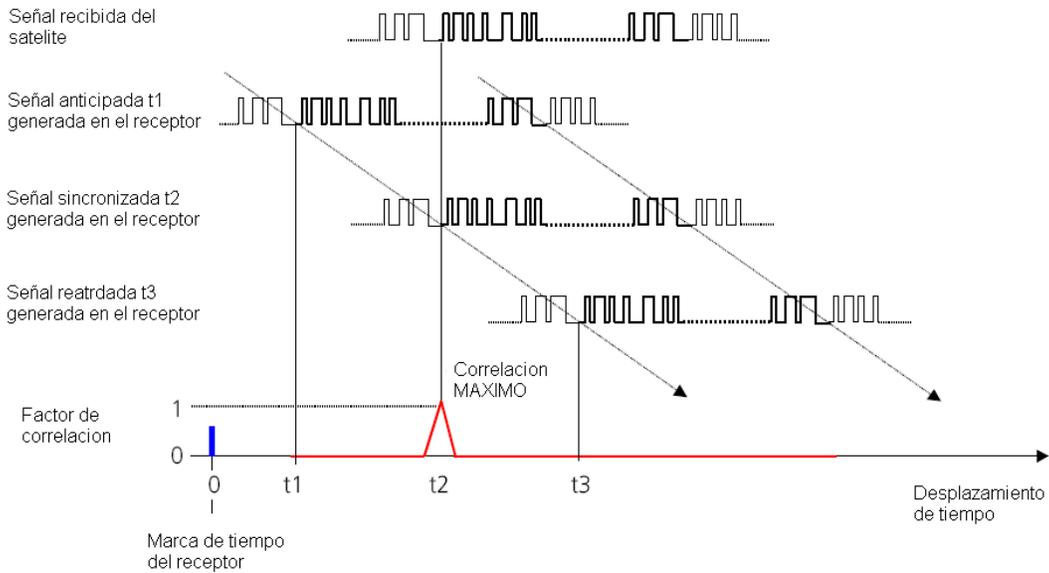


Figura 67. Correlación mediante la búsqueda de máximos.

El desplazamiento de tiempo necesario  $\Delta t_{Ko}$  y la marca de tiempo del receptor, determinan el tiempo de llegada de las señales de los satélites observados

(momento en el tiempo del receptor). En la Figura 68 es mostrado mediante un esquema la forma en que el tiempo de llegada de la señal es calculada.

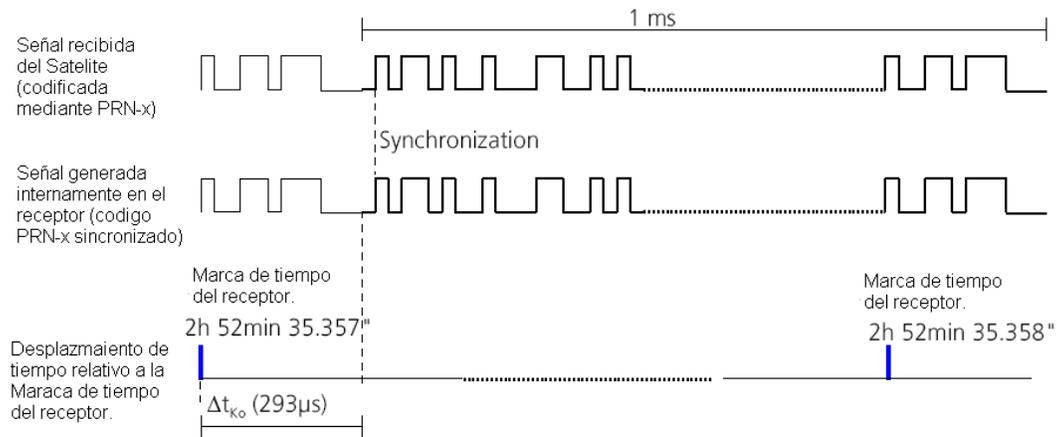


Figura 68. Determinación del tiempo de llegada de la señal.

## FASE 2. RECONSTRUCCION DE LOS DATOS Y MENSAJE DE NAVEGACION.

La máxima correlación es secuencialmente buscada y mantenida, es decir, la señal del satélite y la secuencia PRN-generada por el receptor son continuamente síncronas. El tiempo de desplazamiento de la secuencia PRN (Código C / A) está vinculada a la señal del satélite, y por lo tanto los datos del mensaje de navegación son reconstruidos. La Figura 69 muestra el esquema de cómo la señal es reconstruida en el receptor.

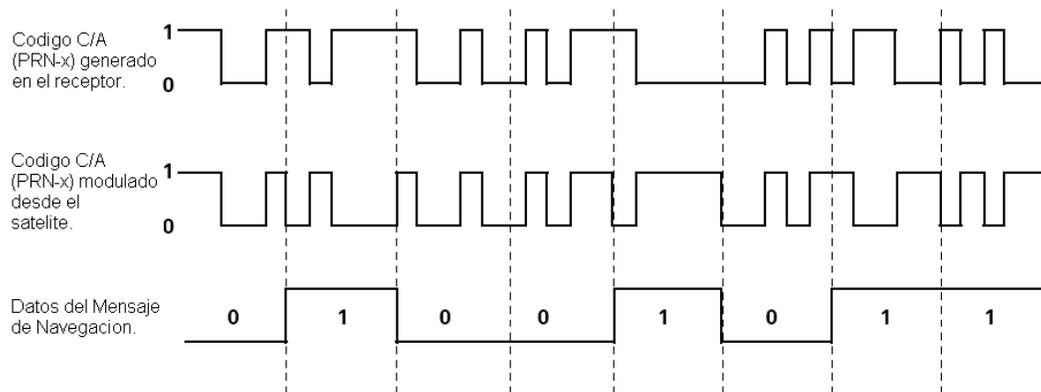


Figura 69. Reconstrucción del Mensaje de Navegación.

## FASE 3. DETERMINACION DEL TIEMPO DE TRANSMISION.

Para explicar el proceso realizado en esta fase, se tomara como ejemplo el mensaje de navegación GPS. Cada subtrama del mensaje de navegación

(como esta explicado en el Capitulo 3) comienza con un preámbulo de 8-bits. El preámbulo de la Palabra de telemetría (TLM) es un patrón definido con la estructura 10001011. Esta secuencia de bits se repite cada 0.6 segundos. El tiempo de transmisión (en tiempo del satélite) del preámbulo se incluye en la Palabra de traspaso (HOW) de la subtrama anterior, con el tiempo de 17 bits del mensaje Tiempo de la Semana (TOW) en el mensaje de navegación. En la Figura 70 se muestra la estructura del mensaje y la posición que estos datos tienen dentro del mensaje de navegación.

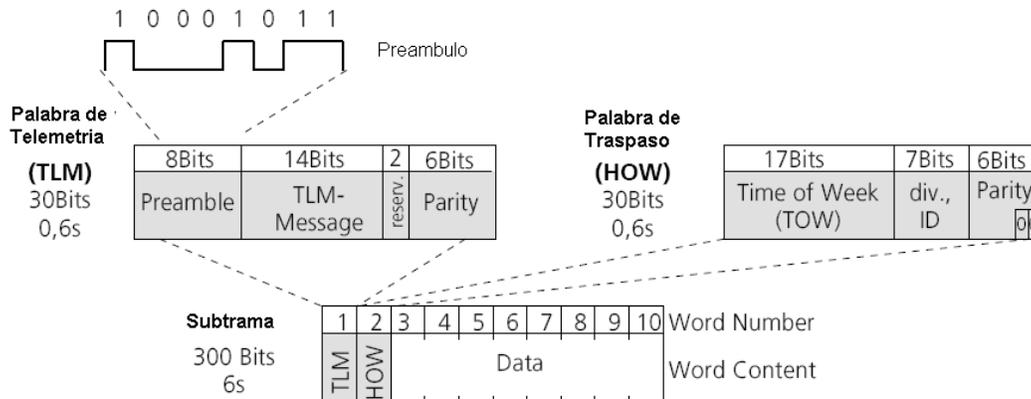


Figura 70. TLM y HOW del mensaje de navegación.

El receptor GPS busca ahora en el mensaje de navegación por el patrón 10001011. Dado que este patrón potencialmente pueden aparecer en otras partes del mensaje de navegación, es también necesario que se cumplan las condiciones de otros parámetros tales como:

Dos 0s lógicos deben aparecer en los bits 51 y 52 después del final del preámbulo (los dos últimos bits de paridad en el HOW se ponen a 0).

La paridad a partir de 16 bits después del preámbulo (la paridad de la Palabra TLM) debe ser correcta.

Los dos bits antes el preámbulo deben ser 0 (los últimos bits de paridad de cada palabra en el extremo de cada subtrama se establecen a 0).

El tiempo dado en el mensaje TOW (17 bits) comenzando 22 bits después del final del preámbulo debe ser aproximadamente correcto. Dado que la información proporcionada es repetida cada 6 segundos. De esta forma, no hay grandes requisitos de precisión para la medición de receptor de la hora.

El preámbulo de la subtrama siguiente debe comenzar exactamente 300 bits siguientes al inicio del preámbulo.

El tiempo de transmisión se proporciona en los primeros bits del preámbulo del mensaje de navegación en el TOW del mensaje de la trama anterior. Esta vez se da en el tiempo de satélite, pero gracias a la información contenida en el mensaje de navegación se puede traducir en tiempo GPS.

Si el preámbulo es validado, el tiempo de llegada de los primeros bits es medido. Esta vez es dado en el tiempo del receptor. Dado que el tiempo del receptor y el tiempo GPS no son idénticos, sino que se diferencian por un valor

de  $\Delta t_0$ , un tiempo de viaje es incorrectamente medido. La Figura 71 muestra el procedimiento para determinar el error de tiempo de viaje.

Las dos diferentes escalas de tiempo utilizados son:  
 Tiempo GPS para el tiempo de transmisión de la señal y el tiempo del receptor para el tiempo de la señal de llegada.

Se representa también la diferencia entre el tiempo GPS y el tiempo del receptor como  $\Delta t$ .

$$T_{\text{medido}} = \Delta t + \Delta t_0$$

$$= \text{Tiempo de llegada}_{\text{tiempo del receptor}} - \text{Tiempo de transmisión}_{\text{tiempo GPS}}$$

$\Delta t$  : tiempo de viaje real de la señal : del satélite al receptor.  
 $\Delta t_0$  : diferencia entre el tiempo del receptor y el tiempo GPS.

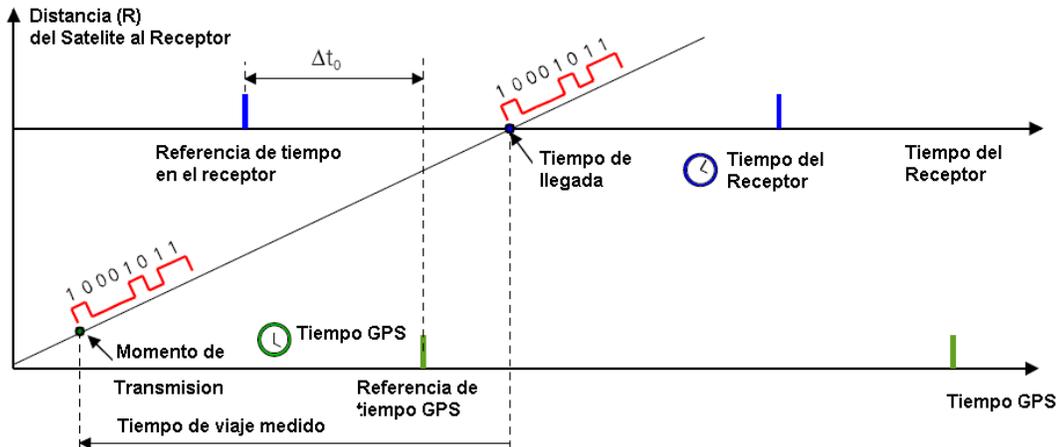


Figura 71. Determinación del error en el tiempo de viaje.

Otros factores afectan también la precisión de las mediciones de los dispositivos receptores GNSS, tales fenómenos como la geometría de los satélites al momento de la transmisión de señales por medio del fenómeno de Disolución de Precisión (DOP)<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Ver Apéndice D.

## **APENDICES.**

### **APENDICE A. ESPECTRO ENSANCHADO.**

El espectro ensanchado es una técnica para transmitir señales con muy poca potencia en un gran ancho de banda. Esta técnica se basa en la definición de capacidad de canal, ya que se puede intercambiar un parámetro como es el ancho de banda  $W$ , por otro como la potencia transmitida  $S$ , sin perder capacidad de transmisión.

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado son poco óptimas en cuanto al uso de ancho de banda en el que se transmite la señal, pero presentan una serie de ventajas:

- \_ Resiste a interferencias.
- \_ Capacidad de compartir el ancho de banda con otras señales.
- \_ Inmune al multitrayecto.
- \_ Privacidad debido a la codificación de su información.

Es por ello que el espectro ensanchado es muy adecuado para la transmisión de información por satélite, donde las pérdidas de propagación son muy altas, y el ancho de banda es compartido por distintos satélites.

Existen distintas técnicas para modular una señal en espectro ensanchado: GPS y Galileo usan DSSS, Y GLONASS usa FHSS.

**DSSS:** En esta técnica se genera un patrón de bits redundante para cada uno de los bits que componen la señal. Cuanto mayor sea este patrón de bits, mayor será la resistencia de la señal a las interferencias. El estándar IEEE 802.11 recomienda un tamaño de 11 bits, pero el óptimo es de 100. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la información original.

La secuencia de bits utilizada para modular los bits se conoce como secuencia de Barker (también llamado código de dispersión o pseudoruido). Es una secuencia rápida diseñada para que aparezca aproximadamente la misma cantidad de 1 que de 0. Solo los receptores a los que el emisor haya enviado previamente la secuencia podrán recomponer la señal original. Además, al sustituir cada bit de datos a transmitir, por una secuencia de 11 bits equivalente, aunque parte de la señal de transmisión se vea afectada por interferencias, el receptor aún puede reconstruir fácilmente la información a partir de la señal recibida. La Figura A1 muestra gráficamente la forma en que la modulación DSSS es llevada a cabo.

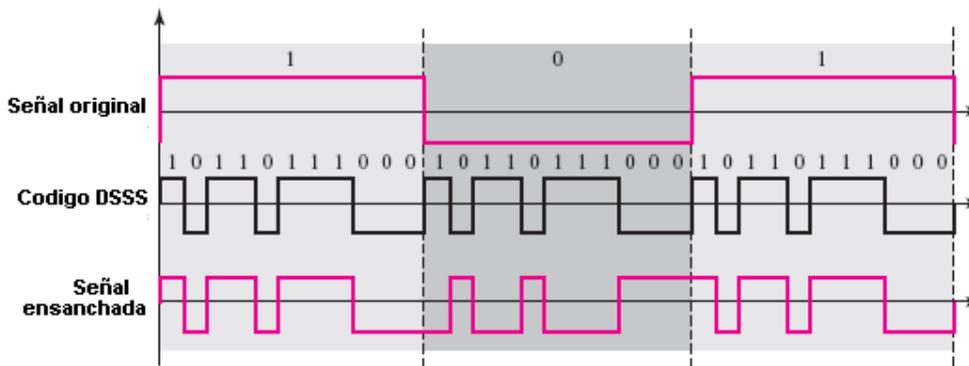


Figura A1. Señal modulada DSSS.

**FHSS:** consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo llamada *dwell time* e inferior a 400 ms. Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se sigue transmitiendo a otra frecuencia. De esta manera cada tramo de información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo.

El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudoaleatoria almacenada en unas tablas, y que tanto el emisor y el receptor deben conocer. Si se mantiene la sincronización en los saltos de frecuencias se consigue que, aunque en el tiempo se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantiene un solo canal por el que se realiza la comunicación.

La Figura A2 muestra esquemáticamente los cambios en la frecuencia a la que los datos son transmitidos con respecto del tiempo.

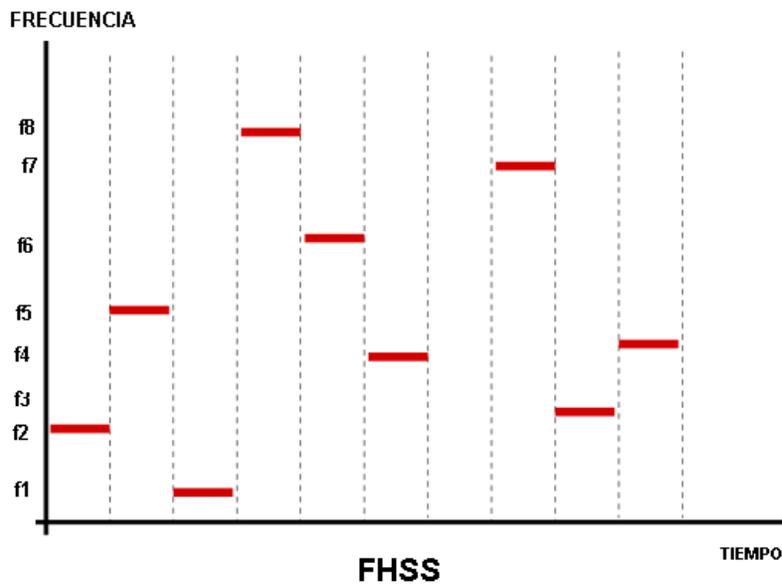


Figura A2. Saltos de frecuencia FHSS.

Los códigos en ambos casos deben tener unas propiedades de autocorrelación y correlación cruzada que permitan que sólo el usuario conocedor del código recupere la información modulada para él. Cuanto más se aproxime la autocorrelación de un código a la de los códigos ortogonales mejor será el código, ya que se podrá distinguir más fácilmente del resto.

En el caso de los sistemas de navegación el método empleado es el DSSS siendo el código empleado la secuencia PRN. Los anchos de banda empleados varían de un sistema a otro.

## **APENDICE A2. MODULACION BPSK Y BOC.**

A fin de que todos los satélites transmitan en la misma frecuencia, las señales GPS se modulan con un código especial. Para las señales del sistema civil de posicionamiento estándar (SPS) este código consiste en un código de ruido pseudo aleatorio (PRN) de 1,023 ceros o unos, y se conoce como el Código C/A. El código, con un período de 1 milisegundo, tiene un chip-rate de 1.023Mbit/s. Este código es repetido continuamente y debido a su estructura única permite que al receptor identificar esta señal la cual es originada en el satélite.

La modulación de la señal de datos se consigue con una operación or-exclusiva (EXOR) tal como se encuentra ilustrado en la Figura A3. El resultado se denomina Binary Phase Shift Keying (BPSK). La señal de frecuencia nominal o de banda de base es generada por uno de los relojes atómicos y de la cual todas las señales de satélite son derivadas. La frecuencia nominal o de banda base es modulada por el Código C / A de  $1 \cdot 1.023\text{Mbit} / \text{s}$ .

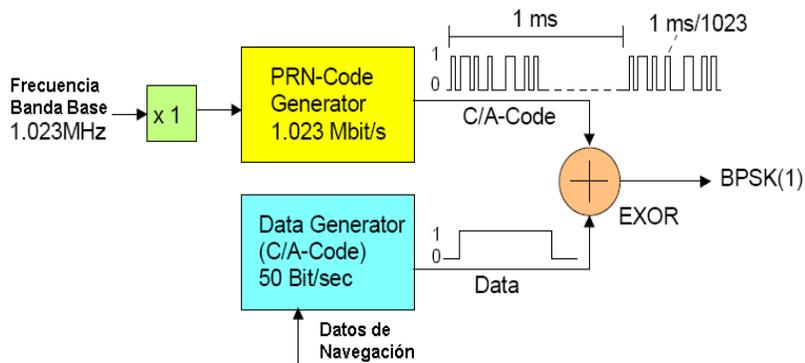


Figura A3. Con modulación BPSK los datos de navegación son modulados con un código C/A.

Los nuevos esquemas de modulación para las nuevas generaciones de satélites de la red GPS y el sistema europeo Galileo, es un proceso de modulación llamado Binary Offset Code Modulation (BOC). Con BOC la señal BPSK se somete a un modulación adicional. La frecuencia de modulación es siempre un múltiplo de la frecuencia de banda base de 1.023MHz.

Las propiedades de esta modulación son definidas de una manera específica. Por ejemplo BOC (10,5) significa que la frecuencia de modulación es un factor de 10 veces la frecuencia nominal o de banda base ( $10 \cdot 1.023\text{MHz}$ ) y el chiprate del código C / A es 5 veces la base ( $5 \cdot 1.023 \text{ Mbit / s}$ ) como es mostrado en el esquema de la Figura A4.

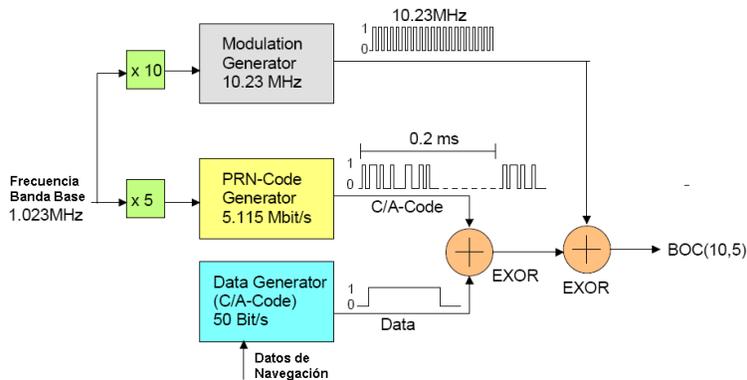


Figura A4. Esquema en bloques de un modulador BOC(10,5).

Con la modulación BOC, la señal se distribuye mejor sobre el ancho de banda y la influencia de oponerse a la reflexión de la señal (multitrayectoria) en la recepción de la señal de navegación se reduce en comparación con BPSK. BPSK (1) y BOC (1,1) tiene un impacto mínimo en los demás cuando se utilizan simultáneamente, ya que su espectro de potencia de densidad máximos están separados como lo muestra la grafica espectral de la Figura 5ª, la misma señal modulada por medio de ambos métodos.

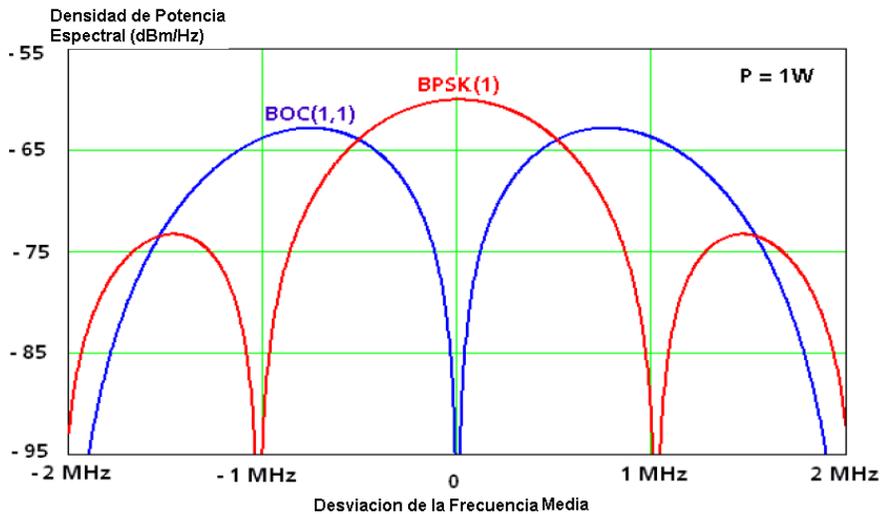


Figura A5. Con modulación BPSK y BOC, los máximos de señal están separados.

## **APENDICE B. TECNICAS DE ACCESO MULTIPLE.**

Las técnicas de acceso múltiple son aquellas que permiten hacer uso de un recurso, el espectro de radiofrecuencia, a múltiples usuarios al mismo tiempo.

Existen diversas técnicas teniendo en cuenta que toda comunicación tiene un volumen tridimensional en tiempo (lo que dura la comunicación) en espacio (la potencia con la que se irradia la señal y que abarca un cierto espacio) y frecuencia (la banda del espectro que se usa para establecer la comunicación).

Se han diseñado tres técnicas que dividiendo uno de estos recursos permiten compartir el canal a múltiples usuarios:

**SDMA:** Space Division Multiple Access. Utilizado en comunicaciones por satélite ya que estos prestan cobertura en un segmento de la Tierra.

**TDMA:** Time Division Multiple Access. Utilizado en redes GSM conjuntamente con FDMA.

**FDMA:** Frequency Division Multiple Access. Utilizado en comunicaciones por satélite.

Un cuarto método diseñado es el CDMA que permite compartir el espectro sin tener que dividir ninguno de los recursos anteriores, sino que permite el acceso múltiple a través de códigos. Esto tiene una serie de ventajas que ya se han citado en la técnica de espectro ensanchado. CDMA es muy utilizado en telefonía móvil y comunicaciones por satélite.

En los sistemas de navegación se emplean las técnicas FDMA en GLONASS, donde cada satélite transmite a su propia frecuencia, y CDMA en GPS y Galileo.

## FDMA

El acceso múltiple por multiplexación en frecuencia consiste en dividir un rango de frecuencias en canales de tal manera que se puedan transmitir distintas señales a la vez por diferentes portadoras sin que interfieran la una con la otra.

Los sistemas FDMA son fáciles de implementar, pero por el contrario su configuración es rígida ya que cada transmisor sólo puede usar su frecuencia conocida para enviar las señales.

En el caso de GLONASS el ancho de banda asignado se divide entre los satélites que forman la constelación, transmitiendo cada satélite en su propia portadora.

## CDMA

Esta técnica de acceso múltiple emplea códigos digitales únicos para diferenciar a los distintos usuarios, en lugar de frecuencias separadas. La técnica CDMA es una técnica que hace uso de la modulación por espectro ensanchado, y su funcionamiento es igual al de DSSS ya que los códigos de cada comunicación se transmiten a una frecuencia (bps) mucho mayor que la de los datos que porta. La figura A6 muestra mediante un esquema, la diferencia que existe entre los métodos de acceso FDMA y CDMA, respecto a las variables de tiempo, frecuencia y potencia de la señal o código.

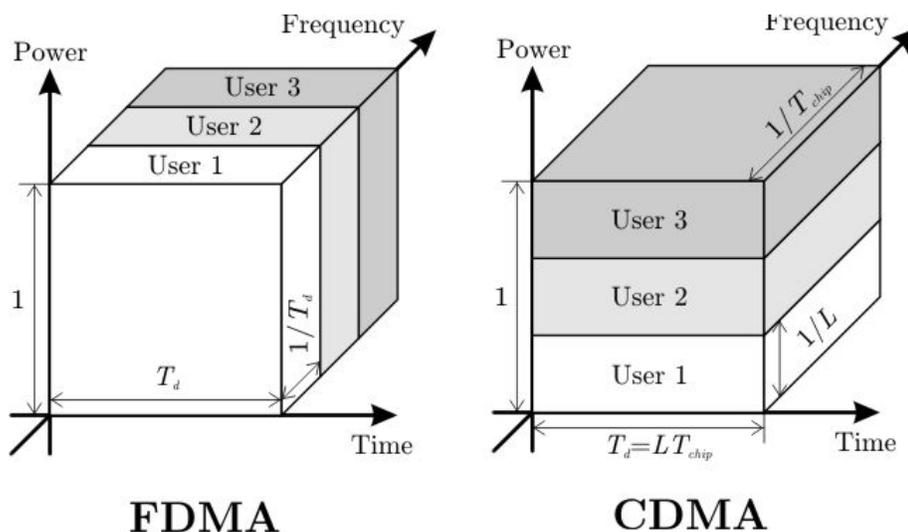


Figura A6. Técnicas FDMA y CDMA.

## APENDICE C. LEYES DE KEPLER.

El movimiento de los satélites en el espacio viene determinada por las leyes del movimiento planetario descrito por Johannes Kepler (1571-1630). Kepler observó que el movimiento de los cuerpos en el espacio se encuentra descrita por tres leyes matemáticas relativamente simples.

### La primera ley de Kepler.

Según Kepler, los planetas orbitan sobre un plano. La órbita forma una elipse con el Sol en uno de los focos o perspectivas. Esta ley también se aplica a los satélites en órbita (como cuerpos en el espacio). Los satélites orbitan en un plano alrededor de la Tierra forma una elipse con la Tierra en uno de los focos. La figura A7 muestra la forma en del plano que orbita un satélite alrededor de la tierra.

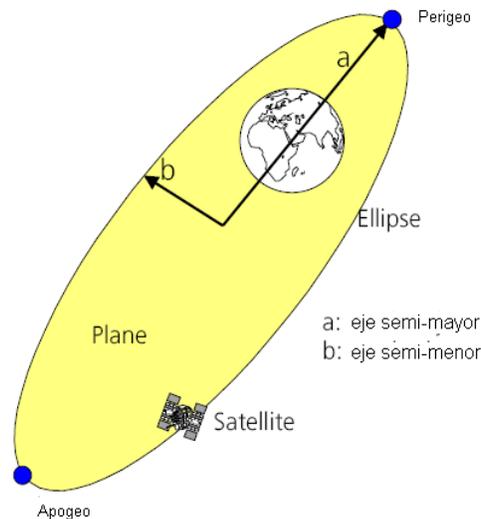


Figura A7. Movimiento de los satelices sobre un plano.

El **apogeo** expresa el punto más alejado de una órbita elíptica desde el centro de la Tierra. Si se resta el valor del radio de la Tierra (aproximadamente 6.378km) de este valor, se determina la altitud máxima del satélite sobre la superficie de la Tierra, el **perigeo** es el punto más cercano de la elipse orbital

de la Tierra. Restando el radio de la Tierra determina altura mínima del satélite por encima de la superficie de la Tierra.

### La segunda ley de Kepler.

La segunda ley establece que: "Una línea que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en intervalos iguales de tiempo". Esto también se conoce como la ley de áreas iguales. Para los satélites, esto significa que la línea que une el satélite y la Tierra barre áreas iguales en intervalos iguales de tiempo. Así, si los tiempos  $Tv_1$  y  $Tv_2$  que se muestran en el esquema de la Figura A8, son los mismos que las áreas  $A_1$  y  $A_2$  también serán las mismas.

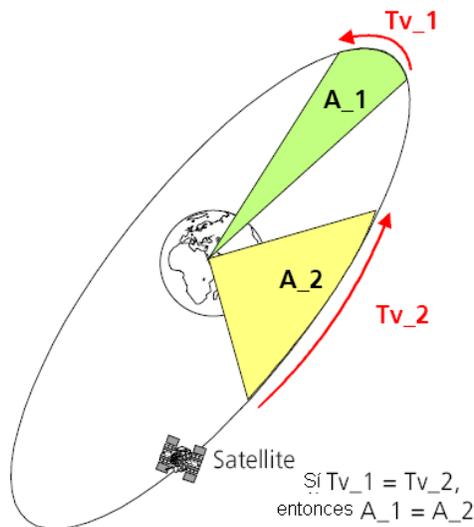


Figura A8. Descripción de la segunda ley de Kepler.

### La tercera ley de Kepler.

Esta ley establece que los cuadrados de los períodos orbitales de los planetas son directamente proporcionales a los cubos de los semi-eje mayor de las órbitas. Esto significa no sólo que los objetos más grandes tienen más largas órbitas, sino también que la velocidad de un planeta en una órbita más largo es menor que en una órbita menor:

$$\frac{P^2}{a^3}$$

es contante para todos los planetas, donde:

P = Periodo orbital, a = eje semi-mayor de la orbita de la elipse.

A partir de esta ley y como es ilustrado en la Figura A9, la altitud orbital del satélite (h) sobre la superficie de la Tierra se pueden derivar:

$$h = \sqrt[3]{3,9860042 \cdot 10^{14} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \cdot \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2} - R_e \quad [\text{m}]$$

Re: Radio de la Tierra (6378,137 km).

P: periodo orbital del satélite alrededor de la Tierra.

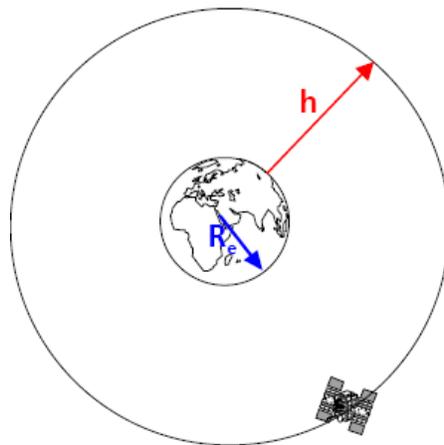


Figura A9. Determinación de la altitud orbital de un satélite.

## **APENDICE D. INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA DE LOS SATELITES EN LA DILUCION DE LA PRECISION.**

La precisión de posicionamiento con navegación GPS depende en una parte a la precisión de las mediciones de pseudodistancia individuales y por otra parte en la configuración geométrica de los satélites utilizados para la adquisición de los datos. Esta configuración es expresada en términos de un valor escalar, a la que se hace referencia en la literatura de navegación como DOP (Dilución de Precisión).

El valor DOP describe el debilitamiento de la precisión y por lo tanto, es un factor o medida dependiente de la imprecisión de la constelación. Si los valores de DOP son altas (por ejemplo, porque todos los satélites visibles están cerca uno del otro), entonces la imprecisión esperada será mayor.

Hay una variedad de términos utilizados DOP:

GDOP (geométrica-DOP): Describe la influencia de la geometría de los satélites en la posición en el espacio 3D y la medición del tiempo.

PDOP (posicional-DOP): Describe la influencia de la geometría de los satélites en la posición en el espacio 3D.

HDOP (Horizontal-DOP): Describe la influencia de la geometría de los satélites en la posición a lo largo sobre un plano (2D).

VDOP (Vertical DOP): Describe la influencia de la geometría de los satélites de la altura (1D).

TDOP (Time-DOP): Describe la influencia de la geometría de los satélites en la medición del tiempo.

La influencia de la geometría de satélites en imprecisión se demuestra en la Figura A10. Cuando los dos satélites están muy separados (figura izquierda) el error de posición (zona en rojo) es más pequeño. Si los satélites están cerca uno del otro (a la derecha la figura), entonces el área de error es más hacia fuera. Esto es válido cuando la incertidumbre para determinar la posición,

conocido como el error de distancia (RE: áreas de color amarillo y azul), es el mismo para ambos satélites. R (R1 y R2) se refiere a la distancia medida de los satélites para el usuario (pseudodistancia).

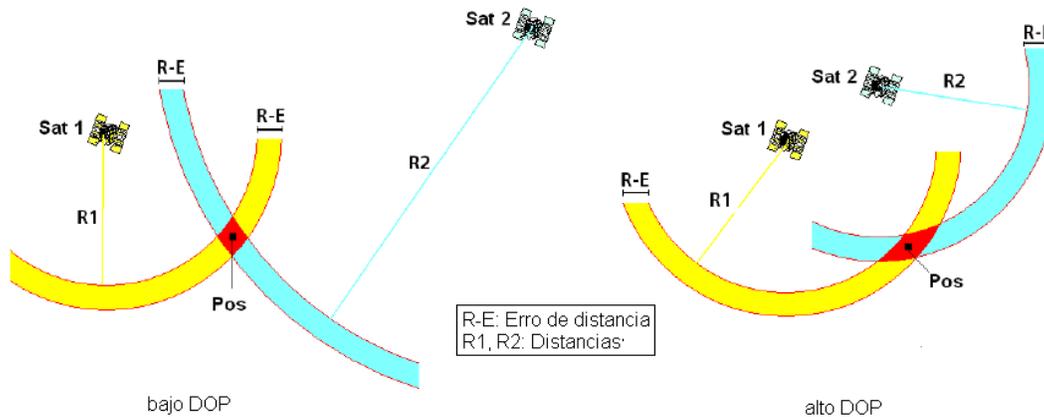


Figura A10. Entre más plano el ángulo con que los círculos con rangos de R1 y R2 se intersectan, cuanto mayor será el valor DOP.

La exactitud posicional se reduce cuando los cuatro satélites utilizados para la medición están muy juntos. La precisión de la medición es proporcionalmente dependiente del valor DOP. Esto significa que cuando el valor DOP se duplica, el error posicional aumenta por un factor de dos.

El valor DOP puede ser visto como el valor recíproco del volumen de un tetraedro formado por la posición de los satélites y el usuario tal y como lo ilustra la Figura A11. Entre mayor sea el volumen del tetraedro, la magnitud del valor DOP (y por tanto la imprecisión) disminuye.

En las zonas montañosas, bosques y zonas urbanas, los valores de DOP juegan un papel importante en la planificación de proyectos de medición. Esto es así porque a menudo hay fases en las que los satélites tienen constelaciones geométricas muy desfavorables. Así, es necesario planificar las mediciones de acuerdo con los valores de DOP (por ejemplo HDOP), o para evaluar la precisión alcanzable dado que diversos valores de DOP puede ocurrir en cuestión de unos pocos minutos.

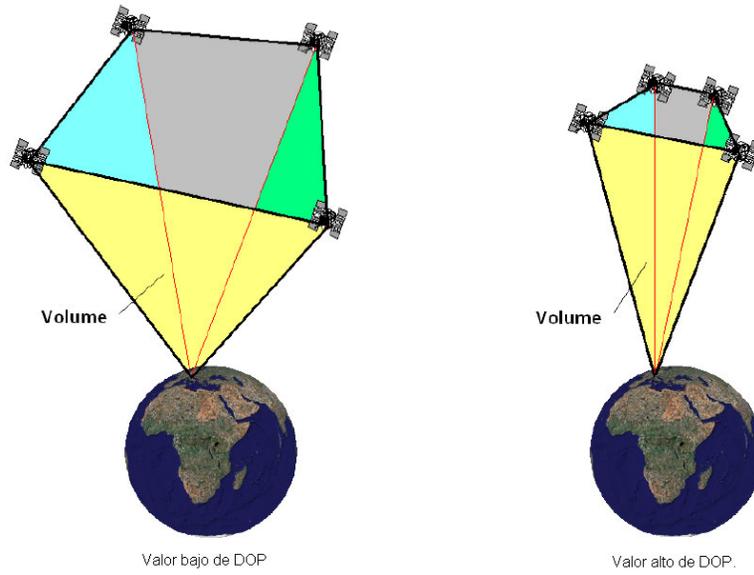


Figura A11. Entre mayor sea el volumen encerrado, menor es el valor de DOP.

## APENDICE E. GUIA BASICA DE USO DE SOFTWARE AGI.

AGI es una compañía desarrolladora de software de simulación de áreas de ingeniería y análisis. AGI desarrolla módulos de trabajo por medio de los cuales se puede generar análisis de aplicaciones de muchas ramas de la ingeniería eléctrica en específico. El modulo STK para modelado de misiones espaciales, lo cual incluye modelado de trayectorias de vuelo, satélites o lanzamiento de cohetes, es el modulo utilizado en este trabajo de graduación.

AGI no es un software de distribución libre. Se debe poseer una licencia ya sea temporal o permanente por medio del proveedor para poder utilizar este software.

Al iniciar el programa las primeras opciones que aparecen son las mostradas en la Figura A12. Las opciones brindadas son *Create a New Scenario* para crear un proyecto nuevo, *Open a Scenario* para abrir un escenario o proyecto guardado y trabajado con anterioridad y *Learn About STK* el cual brinda una ayuda extensa en temas referente a desarrollo de aplicaciones con el modulo STK.



Figura A12. Ventana de opciones inicial del software AGI.

La Figura A13 muestra la ventana emergente al seleccionar la opción para crear un nuevo escenario. La ventana permite definir nuestro proyecto con datos básicos de la simulación como el nombre del proyecto y el destino en el que será guardado dentro de la computadora.

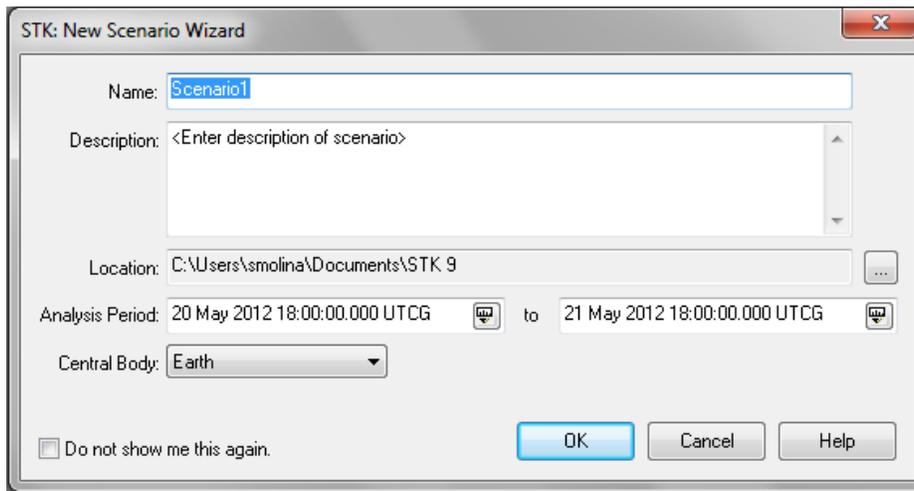
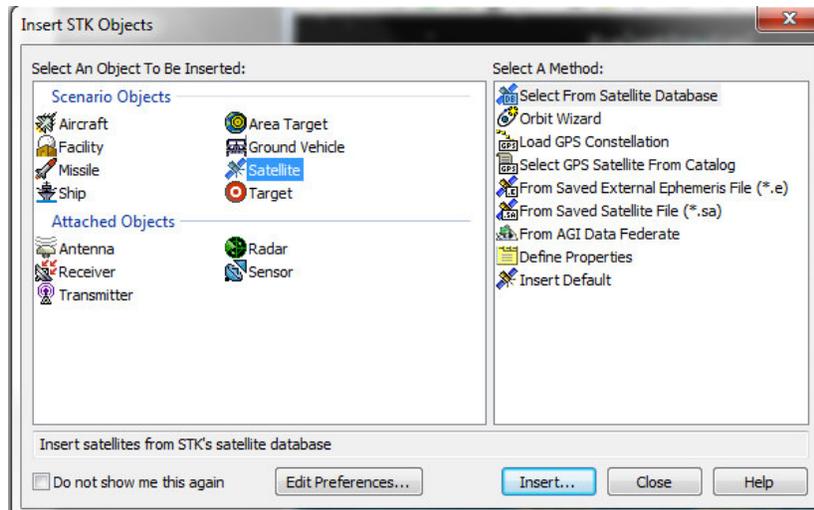


Figura A13. Definición de parámetros básicos del archivo de simulación.

Una opción muy importante es la de la definición de tiempo, el cual genera una situación real de condiciones de la tierra, definiendo datos como la hora de inicio y finalización del escenario de simulación.

Esto es de especial importancia en un proyecto relacionado con satélites y exploración, ya que el movimiento que los satélites realicen durante la simulación, esta regido por las efemérides guardadas en las bases de datos del programa.

La primera de las opciones que el programa ofrece es la de agregar un nuevo objeto a nuestro proyecto, tal y como lo muestra la imagen de la Figura A14. Por medio de la opción *Insert STK Objects* se puede acceder a la lista de objetos de las que puede escogerse para nuestro modelado del proyecto a realizar. La lista incluye elementos como Aviones, estaciones en tierra, Misiles, Barcos, vehículos en tierra, satélites, entre otros. Al menu de objetos tambien se puede acceder desde el menú *Insert/New*.



A14. Lista de objetos para modelado de proyectos.

También ofrece la opción de objetos denominados *Attached Objects*, que son objetos que deben asociarse o vincularse con los *Scenario Objects* para que exista un vínculo entre esos dos objetos, y proveer a un objeto de capacidades de análisis que no posee por si mismo.

El ambiente de trabajo de nuestros proyectos se desarrolla básicamente en dos perspectivas como se ilustra en la Figura A15. Una es la perspectiva en 3D y la otra es una perspectiva 2D.

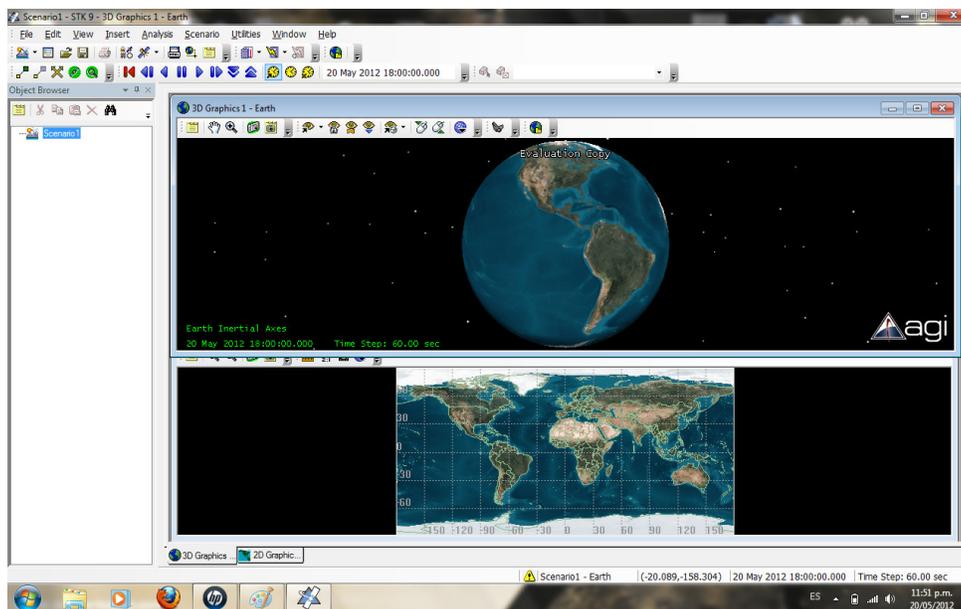


Figura A15. Perspectivas de visualización en 2D y 3D de los proyectos.

Para insertar un objeto desde el menú *Objects* se debe de especificar la ubicación inicial del objeto por medio de la opción *Define properties*.

Esto puede realizarse de dos formas: ingresando las coordenadas manualmente en los campos correspondientes como se muestra en la Figura A16, o dando un click sobre la ubicación del mapa en 2D el cual se desea que el objeto sea situado como posición inicial. Para insertar el objeto de la segunda forma, el campo de *Clicking on map changes current point* debe de estar seleccionado.

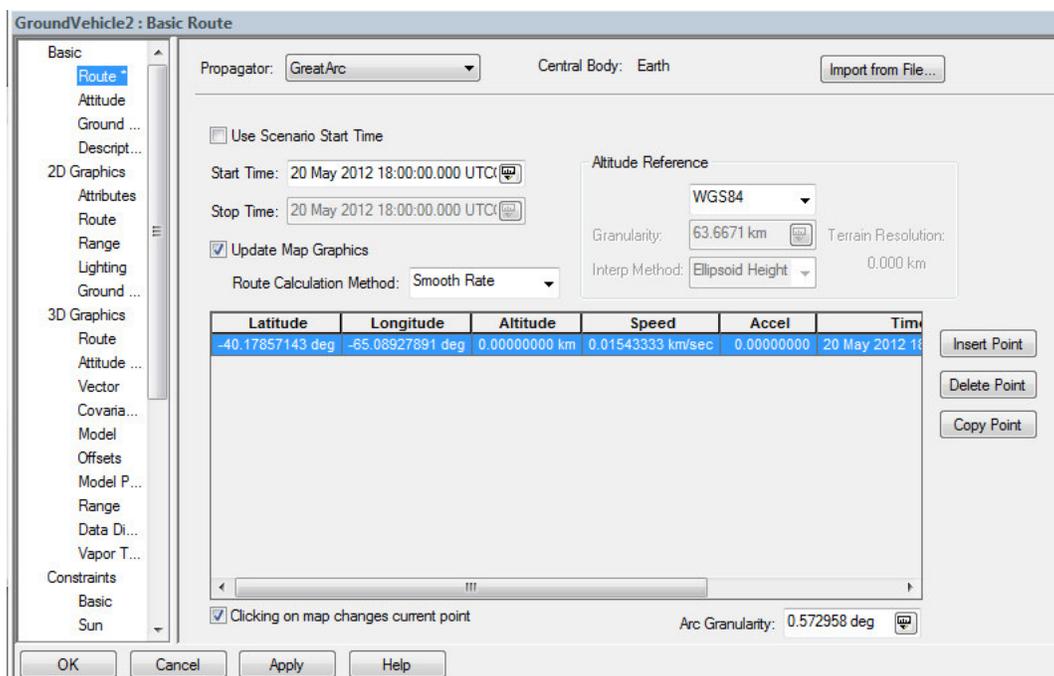


Figura A16. Agregar un objeto especificando su posición inicial dentro del área de trabajo.

Para agregar un satélite se puede realizar también de dos formas distintas. La primera es ingresando manualmente la posición, órbita, inclinación, distancia de eje semi-mayor y excentricidad para definir la trayectoria deseada del satélite. Esta forma es mostrada en la Figura A17.

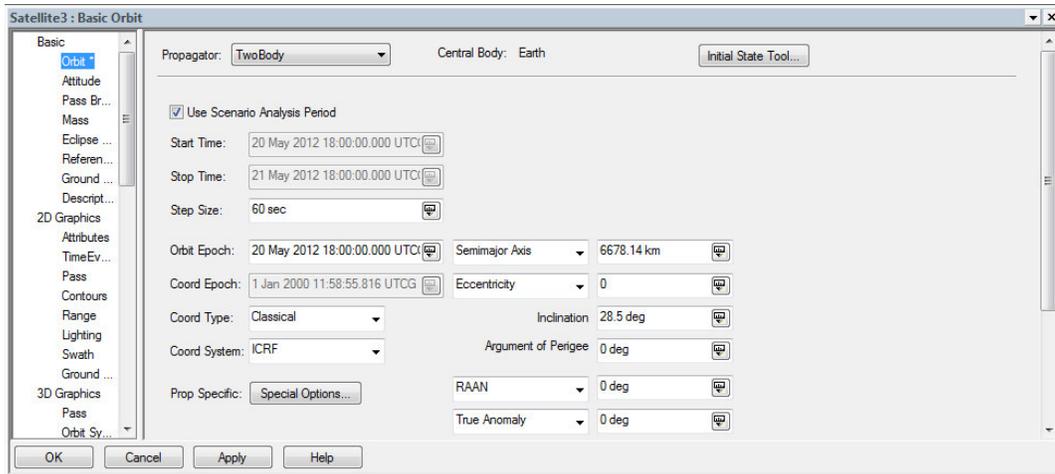


Figura A17. Definición manual de las propiedades de un satélite.

La segunda forma es utilizando la opción *Select from Database*. La Figura A18 muestra la interfaz brindada por el programa donde se puede buscar un satélite en su base de datos por satélites existentes como lo son por ejemplo los radares de la red GLONASS y NAVSTAR GPS.

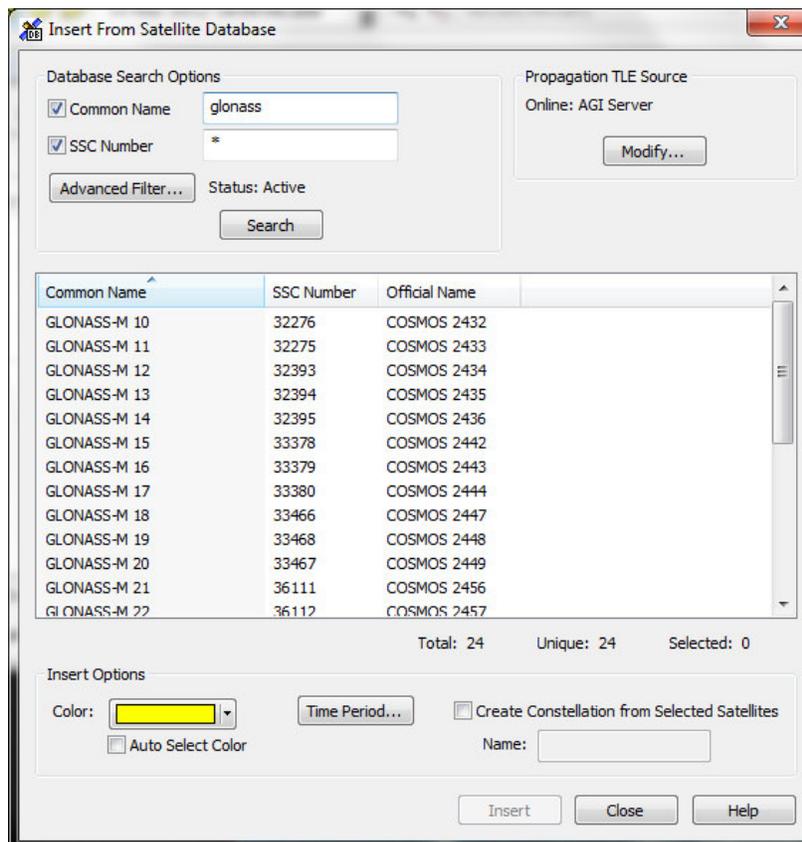


Figura A18. Seleccionar un satélite desde la base de datos del programa.

Para llevar a cabo una simulación, es necesario utilizar la barra de tiempo que controla el inicio de una simulación. La barra de control de la simulación es mostrada en la Figura A19. Por medio de los controles se puede acelerar o disminuir la velocidad a la que la simulación se esta llevando a cabo, detener la simulación, pausarla y retrocederla hasta su inicio.



Figura A19. Barra de control de simulación.

Por medio de los pasos básicos contenidos en este apéndice, se puede proceder a una mejor comprensión de la construcción de la simulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Objetivos estratégicos de la Organización de Aviación Civil Internacional. [http://www.icao.int/icao/en/strategic\\_objectives.htm](http://www.icao.int/icao/en/strategic_objectives.htm)
- [2] Autoridad de Aviación Civil de El Salvador AAC. <http://www.aac.gob.sv/index.php/institucion/historia.html>
- [3] Comité Ejecutivo de Puertos y Aeropuertos de El Salvador. <http://www.aeropuertoelsalvador.gob.sv/index.php>
- [4] Flight Information region. RAC - 2.0 AIRSPACE – REQUIREMENTS AND PROCEDURES. 2.4. Flight Information Regions. <http://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/publications/tp14371-rac-2-0-2599.htm#2-4>
- [5] COCESNA. Áreas de Servicios. <http://www.cocesna.org/acna.php>
- [6] Sistemas y equipos terrestres para la Navegación Aérea. <http://www.dgac.gov.ec/Espa%C3%B1ol/Documents/electronica.pdf>
- [7] Ground Training Notes on Air Navigation. <http://www.rwsi.org/JEPPESEN.pdf>
- [8] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol I:Radioayudas para la Navegación. 3.3 Especificación para el radiofaro omnidireccional VHF (VOR).
- [9] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol I:Radioayudas para la Navegación. 3.4 Especificación para el radiofaro no direccional (NDB).
- [10] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol I:Radioayudas para la Navegación. 3.5 Especificación para el equipo radiotelemétrico UHF (DME).
- [11] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol I:Radioayudas para la Navegación. 3.1 Especificación para el ILS.
- [12] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol IV :Sistemas de Vigilancia y Anticolisión.
- [13] Anexo X OACI. Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vol I: Radioayudas para la Navegación. 3.7 Requisitos para el sistema mundial de navegación por satélite (GNSS).
- [14] Sistema GNSS. (David Alberto García Álvarez, 2008). <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>
- [15] CNS/ATM SYSTEMS. <http://www.icao.int/icao/en/ro/rio/execsum.pdf>
- [16] Desarrollo de Sistemas de Posicionamiento Global. <http://www.insidegnss.com/>
- [17] Do we need Augmentation Systems? (Septiembre 2007, Adam Gorski and Greg Gerten) [http://www.agi.com/downloads/media-center/in-the-news/EJN\\_Sept07.pdf](http://www.agi.com/downloads/media-center/in-the-news/EJN_Sept07.pdf)

- [18] AGI STK Software para modelados Aeroespaciales.  
<http://www.agi.com/products/by-product-type/applications/stk/stk-for-uav-and-aircraft-missions/>
- [19] RAND. Laboratorio de ideas norteamericano, formado para ofrecer en un primer momento, investigación y desarrollo a las fuerzas armadas norteamericanas. <http://www.rand.org/>
- [20] Sistemas de Navegación por Satélite independientes del GPS.  
[http://www.seguridadaerea.es/AESA/LANG\\_CASTELLANO/NAVEGACION/PROGRAMAS/GALILEO/ventajas.htm](http://www.seguridadaerea.es/AESA/LANG_CASTELLANO/NAVEGACION/PROGRAMAS/GALILEO/ventajas.htm)
- [21] Sistema de Navegacion Chino COMPASS.  
<http://www.insidegnss.com/node/2090>
- [22] Interoperatividad entre sistemas de Navegación basados en satélites.  
<http://www.insidegnss.com/node/2449>
- [23] GPS, Essentials of Satellite Navigation, página 10. (Archivo anexo)
- [24] Áreas de Sistemas de Aumentación.  
<http://www.insidegnss.com/aboutregional>
- [25] Augmentation Systems and Augmentation Areas.  
[http://www.elisanet.fi/master.navigators/InfoEGNOS\\_WAAS.htm](http://www.elisanet.fi/master.navigators/InfoEGNOS_WAAS.htm)
- [26] Segmento Espacial GPS.  
<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [27] Estaciones del Segmento de Control GPS  
<http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- [28] GLONASS Overview.  
<http://www.glonass-center.ru/en/guide/>
- [29] GLONASS Overview. (Archivo Anexo)
- [30] Sistemas satelitales actualmente en órbita.  
<http://www.glonass.it/eng/Constellation-glonass.aspx>
- [31] Segmento Espacial GALILEO.  
[http://www.esa.int/esaNA/SEM5K8W797E\\_galileo\\_2.html](http://www.esa.int/esaNA/SEM5K8W797E_galileo_2.html)
- [32] Primer satélite de nueva constelación GALILEO.  
<http://www.cope.es/ocio/21-10-11--el-primer-satelite-galileo-lanzado-al-espacio-263527-1>
- [33] Categorías de Aproximación.  
<http://www.hispaviacion.es/articulos/ils.html>
- [34] UIT, World Radiocommunication Conference  
<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=rhome&lang=es>
- [35] Nueva generación de satélites GPS para el GNSS-2.  
[http://www.globalsecurity.org/space/systems/gps\\_2r.htm](http://www.globalsecurity.org/space/systems/gps_2r.htm)

- [36] Señales de uso civil GPS  
<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [37] Modo Anti-Spoofing  
<http://www.gpsworld.com/GNSS%20System/Signal%20Processing/straight-talk-anti-spoofing-12471>
- [38] Estructura del mensaje de navegacion GPS.  
<http://www.insidegnss.com/node/3072>
- [39] Metodo de Series de Taylor.  
[http://www.tonahtiu.com/notas/metodos/serie\\_taylor.htm](http://www.tonahtiu.com/notas/metodos/serie_taylor.htm)
- [40] AGI. Página oficial.  
<http://www.agi.com/about-agi/>
- [41] Efecto Doppler de las señales.  
<http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html>
- [42] Orbitas que describen los satélites artificiales.  
- [http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/comunicaciones/satelites-orbitas.html?x=20070821klpinginf\\_62.Kes&ap=1](http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/comunicaciones/satelites-orbitas.html?x=20070821klpinginf_62.Kes&ap=1)  
- [http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo12\\_99.00/orbitas.htm](http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo12_99.00/orbitas.htm)
- [43] Velocidad de la Luz en el vacío.  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm>