



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE SISTEMAS DE NAVEGACIÓN  
AÉREA POR RADIOAYUDAS TERRESTRES, A LOS BASADOS POR  
SATÉLITE EN GUATEMALA/CENTROAMÉRICA**

**Edgar René Alay García**

Asesorado por el Ing. Rony Humberto Montenegro González

Guatemala, marzo de 2007

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE SISTEMAS DE NAVEGACIÓN  
AÉREA POR RADIOAYUDAS TERRESTRES, A LOS BASADOS POR  
SATÉLITE EN GUATEMALA/CENTROAMÉRICA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDGAR RENÉ ALAY GARCÍA**

ASESORADO POR EL ING. RONY HUMBERTO MONTENEGRO  
GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez García
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AÉREA POR RADIOAYUDAS TERRESTRES, A LOS BASADOS POR SATÉLITE EN GUATEMALA/CENTROAMÉRICA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 14 de junio de 2004.



Edgar René Alay García

Guatemala, 9 de noviembre de 2006

Ingeniero  
Julio César Solares Pénate  
Coordinador Area Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Respetable Ingeniero Solares:

Por este medio me permito informarle que, después de haber asesorado al señor Edgar René Alay García, en el desarrollo de su trabajo de tesis titulado: Estudio de la migración de sistemas de navegación aérea por radioayudas terrestres, a los basados por satélite en Guatemala/Centroamérica, considero que cumple con los objetivos planteados, por lo que extendiendo la presente carta para que se continúen los trámites de aprobación correspondientes.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rony Montenegro', with a large, stylized flourish at the end.

Ing. Rony Montenegro  
Ingeniero Electrónico Colegiado No. 4844

RM/sdem.



Guatemala, 28 de noviembre 2006.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**Estudio de la migración de sistemas de navegación aérea por  
radioayudas terrestres, a los basados por satélite en  
Guatemala/Centroamérica.** desarrollado por el estudiante; Edgar René  
Alay García, por considerar que cumple con los requisitos establecidos  
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Solares Peñate  
Coordinador Área de Electrónica

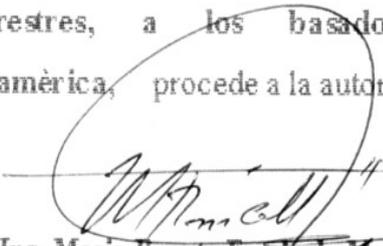
JCSP/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Edgar René Alay Garcia titulado: **Estudio de la migración de sistemas de navegación aérea por radioayudas terrestres, a los basados por satélite en Guatemala/Centroamérica,** procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



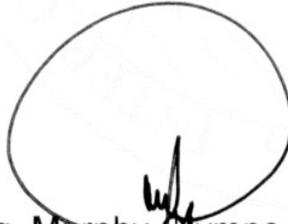
GUATEMALA, 12 DE ENERO 2,007.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AÉREA POR RADIOAYUDAS TERRESTRES, A LOS BASADOS POR SATÉLITE EN GUATEMALA/CENTROAMÉRICA**, presentado por el estudiante universitario **Edgar René Alay García**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, marzo de 2007

## **AGRADECIMIENTO A:**

**DIOS**

Por ser mi creador, salvador y el más grande amor.

**MI FAMILIA**

Por su apoyo.

**MI MAMÁ**

Por ser un ejemplo positivo en mi vida.

**LA UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Por instruirme en conocimientos científico/tecnológicos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
GLOSARIO.....	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XIV
<b>1. RADIOAYUDAS PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA ( SISTEMAS ACTUALES/CONVENCIONALES )</b>	
1.1 Sumario.....	1
1.2 Radiofaro no direccional NDB ( <i>Non Direccional Beacon</i> ).....	2
1.2.1 Teoría del funcionamiento.....	2
1.2.2 Componentes que lo conforman.....	4
1.2.3 Diagrama a bloques.....	4
1.2.4 Red de NDB en Guatemala.....	5
1.3 Equipo de medida de distancia DME ( <i>Distance Measuring Equipment</i> )	
1.3.1 Teoría del funcionamiento.....	7
1.3.2 Características principales.....	8
1.3.3 Capacidad del sistema.....	9
1.3.4 Radiofrecuencias y números de canales.....	10
1.3.5 Cifrado de los impulsos.....	11
1.3.6 Retardo de tiempo.....	11

1.3.7	Cobertura.....	12
1.3.8	Precisión.....	12
1.3.9	Tiempo a la estación y velocidad con respecto a la tierra..	14
1.3.10	Equipo interrogador DME.....	14
1.3.11	Descripción del diagrama a bloques del sistema DME y del interrogador.....	14
1.3.12	Red de equipos DME en Guatemala.....	17
1.4	Equipo de medida de distancias omnidireccional por VHF VOR ( <i>Very high frequency OmniRange</i> )	
1.4.1	Teoría del funcionamiento.....	18
1.4.2	Componentes que lo conforman.....	20
1.4.3	Diagrama a bloques.....	23
1.4.4	Red de equipos VOR en Guatemala.....	27
1.5	Equipo del sistema de aterrizaje por instrumentos ILS ( <i>Instrument Landing System</i> )	
1.5.1	Teoría del funcionamiento.....	28
1.5.2	Diagrama a bloques.....	29
1.5.3	Componentes que lo conforman.....	30
1.6	Limitaciones de los sistemas convencionales.....	34

## **2. SISTEMAS DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN MEDIANTE SATÉLITES**

2.1	Sumario.....	41
2.2	Reseña histórica.....	42
2.3	Principio de funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite.....	43
2.3.4	Segmento espacial.....	45
2.3.5	Segmento de control.....	46

2.3.6	Segmento de usuarios.....	48
2.4	El sistema GPS.....	49
2.4.1	Principio de funcionamiento.....	50
2.4.2	Tipos de servicios.....	53
2.4.3	Servicio de Precisión.....	53
2.4.4	Servicio Estándar.....	54
2.5	Señales y datos GPS.....	54
2.6	Precisión.....	62
2.7	GPS diferencial.....	63
2.8	El sistema GLONASS.....	68

### **3. SISTEMAS DE AUMENTACIÓN DE LA SEÑAL GPS**

3.1	Sumario.....	73
3.2	Sistema de aumentación basado en satélites.....	76
3.3	Sistema de aumentación de área Amplia.....	81
3.3.1	Elementos que componen el sistema WAAS.....	83
3.3.2	Estaciones de referencia de área amplia.....	84
3.3.3	Estaciones Maestras de área amplia.....	85
3.3.4	Estaciones de comunicaciones.....	86
3.3.5	Satélites geoestacionarios.....	86
3.3.6	Receptores.....	86
3.3.7	Beneficios.....	84
3.4	Sistema EGNOS.....	88
3.5	Sistema de aumentación basado en tierra.....	95
3.6	Sistema de aumentación de área local.....	96
3.6.1	Partes del sistema LAAS.....	98
3.6.2	Objetivos y requerimientos del LAAS.....	100

**4. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE  
EN GUATEMALA**

4.1	Sumario.....	103
4.2	Transición al GPS aumentado.....	105
4.3	Retiro gradual de sistemas convencionales.....	107
4.4	Propuesta de aumentación.....	112
4.4.1	Elección del tipo de aumentación.....	112
4.4.2	Ventajas y desventajas del tipo elegido.....	122
4.4.3	Diseño del sistema.....	124
4.4.4	Partes del sistema.....	143
4.4.5	Mediciones esperadas para la puesta en marcha.....	146
4.4.6	Comparación de costos de las instalaciones basadas en satélite y los basados en sistemas convencionales.....	148
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>153</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>155</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>157</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Diagrama a bloques NDB.....	5
2. Red NDB en Centroamérica.....	6
3. Sistema de navegación Rho-Theta.....	9
4. Diferencia entre distancia oblicua y proyección sobre el terreno.....	13
5. Diagrama a bloques simplificado del DME instalado en aeronave.....	16
6. Red de radioayudas DME/VOR.....	17
7. Analogía para compresión del VOR.....	19
8. Diagrama a bloques del VOR.....	24
9. Diagrama a bloques del DVOR.....	26
10. Aerovías formadas por radioayudas VOR.....	28
11. Indicación del localizador a la aeronave.....	30
12. Partes del localizador.....	32
13. Indicación de la senda de descenso a la aeronave.....	33
14. Senda de descenso instalada en un aeropuerto.....	34
15. FIR Centroamericana.....	36
16. Coberturas de cuatro satélites a diferentes longitudes.....	37
17. Principio de funcionamiento sistema GPS.....	45
18. Representación simplificada de una constelación nominal GPS.....	46
19. Red de monitorización y control del sistema GPS.....	47
20. Ubicación de un receptor por dos satélites GPS.....	51
21. Localización de un receptor por medio de tres satélites.....	52
22. Señales transmitidas por satélites GPS.....	57
23. Formato de datos de navegación GPS.....	59
24. Medición de la pseudodistancia.....	61

25. Posicionamiento GPS diferencial.....	64
26. Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS).....	79
27. Sistema de aumentación de área amplia WAAS.....	82
28. Satélites geoestacionarios del EGNOS.....	89
29. Sistema de aumentación de área local LAAS.....	99
30. Transición de los servicios de radioayudas, proyectados por la FAA de los E.U.....	109
31. Fases de vuelo.....	117
32. Segmento de espectro radioeléctrico de UHF.....	131
33. Estructura de la señal de Galileo.....	132
34. Relaciones funcionales del sistema de navegación aérea basado en satélite.....	137
35. Sistema de aumentación a bloques.....	144
36. Ejemplo del histograma del error de la posición horizontal.....	147

## TABLAS

I. Resumen de limitaciones de radioayudas terrestres.....	39
II. GPS frente a GLONASS.....	70
III. Comparación de requisitos GPS frente a Aviación Civil Cat.1.....	75
IV. Tipos de servicios de SBAS.....	80
V. LAAS - Objetivos y requerimientos.....	101
VI. Evolución de los sistemas de Navegación Aérea.....	111
VII. Comparación entre los posibles núcleos del GNSS propuesto para la región correspondiente a Guatemala.....	113
VIII. Resultado de la comparación entre los posibles núcleos del GNSS propuesto para la región correspondiente a Guatemala.....	115
IX. Nivel de servicio de los elementos de aumentación del GNSS..	118
X. Estimación de costos de inversión inicial en sistemas actuales y basados en satélite.....	149
XI. Recomendación de transición a los nuevos sistemas en Guatemala .....	156



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b><math>\mu\text{s}</math></b>	Microsegundos ( $1 \times 10^{-6}$ segundos)
<b><math>\tau</math></b>	Retardo introducido por el transpondedor que por razones de compatibilidad es de $50 \mu\text{s}$
<b>c</b>	La velocidad de la luz.
<b>d</b>	La distancia de la aeronave a la estación terrena.
<b><math>E_c</math></b>	Amplitud pico del voltaje de la portadora no modulada (voltios).
<b><math>E_m</math></b>	Amplitud pico del voltaje de la forma de onda de salida modulada (voltios).
<b>GHz</b>	Gigahertz ( $1 \times 10^{12}$ Hertz)
<b>KHz</b>	Kilohertz ( $1 \times 10^3$ Hertz)
<b>Km</b>	Kilometro ( $1 \times 10^3$ metros)
<b>m</b>	Coeficiente de modulación
<b>MHz</b>	Megahertz ( $1 \times 10^6$ Hertz)



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABAS</b>	Sistema de aumentación basado en aeronave.
<b>DME</b>	Equipo de medición de la distancia, utilizado como radioayuda.
<b>DoD</b>	Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
<b>EGNOS</b>	<i>European Geostationary Navigation Overlay</i> . Sistema Europeo de aumentación basado en satélite.
<b>ESA</b>	Del inglés <i>European Space Agency</i> (Agencia espacial Europea). Se encarga de formular los proyectos relativos a la navegación aérea. Estos son EGNOS y Galileo.
<b>ESTB</b>	Prototipo del sistema EGNOS, para probar y apoyar el sistema.
<b>ETG</b>	Grupo Tripartita Europeo, compuesto por ESA, EUROCONTROL y la comisión europea.
<b>FAA</b>	Del inglés <i>Federal Aviation Administration</i> , agencia norteamericana dedicada a la administración aérea.

<b>FIR</b>	<i>Flight Information Region.</i> Es un área para la cual se prestan los servicios de información de vuelo o servicios de navegación. Como ejemplo se tiene la FIR centroamericana, que es el área sobre Centroamérica y parte de los océanos Pacífico y Atlántico, especificada en la Figura 15.
<b>FDE</b>	Del inglés <i>Fault Detection and Exclusion.</i> Técnica usada por el sistema de aumentación basado en aeronave (ABAS) en la que si detecta un satélite de navegación fallado, lo excluye del cálculo de la distancia hacia la aeronave.
<b>GBAS</b>	Sistema de aumentación basado en tierra.
<b>GEO</b>	Satélite geoestacionario utilizado por el sistema WAAS.
<b>GES</b>	Estación terrena (satelital) de retransmisión de datos.
<b>GIVE</b>	Del inglés <i>Grid Ionospheric Vertical Error.</i> Límite sobre el error residual del retardo vertical ionosférico en un específico IGP.
<b>GLONASS</b>	Sistema de posicionamiento global, desarrollado y administrado por el gobierno Ruso.
<b>GNSS</b>	Es el sistema de navegación global basado en satélite.

<b>GPS</b>	Sistema de posicionamiento global, desarrollado y administrado por los Estados Unidos.
<b>GREPECAS</b>	El grupo Grepecas coordina la planificación e implementación de los sistemas de aumentación GNSS en las regiones CAR/SAM (el Caribe y Suramérica).
<b>ICAO</b>	Del inglés <i>International Civil Aviation Organization</i> , es la organización internacional de aviación civil.
<b>IGP</b>	Punto donde la línea entre el satélite de navegación y el receptor cruza la ionósfera. Estos son definidos por la ICAO en un mapa alrededor del mundo.
<b>ILS</b>	Sistema de aterrizaje por instrumento.
<b>INMARSAT</b>	Organización dedicada a prestar servicios de comunicaciones móviles por satélite.
<b>LAAS</b>	Sistema de aumentación de área local.
<b>MCCs</b>	Centros de control maestro, del sistema EGNOS.
<b>MTSAT</b>	<i>Multi-Functional Transport Satellite</i> . Sistema de aumentación japonés basado en satélite.
<b>N.M.</b>	Milla náutica 1 N.M. = 1852 km = 6076 pies

<b>N/A</b>	No aplica.
<b>NDB</b>	Radiofaro no direccional, utilizado como radioayuda.
<b>OACI</b>	Organización de Aviación Civil Internacional.
<b>ORPAC</b>	Organización encargada de la navegación aérea del Perú.
<b>PRC</b>	Código pseudoaleatorio, utilizado en los satélites.
<b>RAIM</b>	Del inglés Receiver autonomous integrity monitoring. Técnica usada por el sistema de aumentación basado en aeronave (ABAS), que utiliza redundancia en equipos.
<b>RIMS</b>	Estaciones de monitoreo de integridad y posicionamiento, utilizadas por el EGNOS.
<b>ROE</b>	Relación de onda estacionaria.
<b>rpm</b>	Revolución por minuto.
<b>SBAS</b>	Sistema de aumentación basado en satélite.
<b>UDRE</b>	Del inglés User Differential Range Error. Límite de la confianza del 99.9% de la combinación del error de largo plazo del reloj, los errores de efemérides y las

	correcciones inmediatas para un designado satélite, en un sistema de aumentación.
<b>UHF</b>	Rango de frecuencias ultra altas de 300 MHz a 3 GHz.
<b>VHF</b>	Rango de frecuencias muy altas de 30 MHz a 300 MHz.
<b>VOR</b>	Equipo que proporciona información del ángulo azimutal (ángulo formado entre la dirección de la aeronave y el norte magnético).
<b>WAAS</b>	Sistema de aumentación basado en satélite de área amplia, desarrollado por los Estados Unidos.
<b>WMS</b>	Estación maestra del sistema WAAS. Que se encarga de procesar la información proveniente de las estaciones de referencia.
<b>WRS</b>	Estación de referencia de área amplia (WAAS).



## GLOSARIO

<b>Anexo 10</b>	Documento producido por OACI, que norma lo relativo a las Telecomunicaciones aeronáuticas como lo son: Radioayudas para la navegación aérea, sistemas de comunicaciones, vigilancia radar y utilización de frecuencias para uso aeronáutico.
<b>Aviónica</b>	Instrumentos a bordo de una aeronave que usualmente se utilizan para indicaciones de navegación.
<b>Banda Lateral</b>	Un VOR genera dos bandas laterales, por medio del uso de una subportadora, estas son $f_0+9960$ Hz y $f_0-9960$ Hz.
<b>Continuidad</b>	Es la probabilidad que un sistema seguirá disponiéndose durante una fase determinada.
<b>Datum</b>	Un datum define el tamaño y forma de la tierra, su origen y orientación del sistema de coordenadas utilizado para identificar cada punto del globo terraqueo con un mapa.
<b>Disponibilidad</b>	Es la proporción de tiempo durante el cual el sistema cumple con los requisitos de performance o rendimiento bajo ciertas condiciones.

<b>Efemérides</b>	Posición del satélite o bien el set de datos usados para predecir la localización del satélite a cualquier tiempo.
<b>Espectro Radioeléctrico</b>	Distribución de la energía electromagnética a través de rangos de frecuencias.
<b>EUROCONTROL</b>	Organización europea para la seguridad de la navegación aérea.
<b>Exactitud</b>	Significa el nivel de conformidad entre la posición estimada de una aeronave y su posición verdadera.
<b>Frecuencia</b>	Es el número de veces que se repite un fenómeno en un segundo. Dicha tasa de repetición en este trabajo, se refiere a una onda electromagnética o de radio.
<b>Galileo</b>	Sistema de navegación global por satélite, de iniciativa europea.
<b>Geodesia</b>	Es la ciencia relacionada con el estudio de la forma y el tamaño de la tierra en sentido geométrico, así como con la forma de las superficies equipotenciales de potencial gravitacional. Friedrich R. Helmert ( 1880 ).

<b>Integridad</b>	Es la función de un sistema que advierte a los usuarios de una manera oportuna, cuando no debe ser usado dicho sistema.
<b>Levantamiento Geodésico</b>	Relativo a la Geodesia y determinación de las coordenadas (longitud, latitud y altura) sobre la tierra.
<b>Medio principal</b>	Sistema de navegación aprobado para determinada operación o fase de vuelo, que debe satisfacer los requisitos de exactitud y de integridad, pero que no es necesario que satisfaga los requisitos de plena disponibilidad y continuidad del servicio. Se mantiene la seguridad limitando los vuelos a períodos específicos de tiempo, y mediante restricciones.
<b>Medio Suplementario</b>	Sistema de navegación que debe utilizarse conjuntamente con un sistema certificado como medio único. Debe satisfacer los requisitos de exactitud y de integridad para una determinada operación o fase del vuelo, pero no es necesario satisfacer los requisitos de disponibilidad y de continuidad.
<b>Medio unico</b>	Sistema de navegación para determinada operación o fase del vuelo que debe posibilitar satisfacer, en dicha operación o fase del vuelo, los cuatro requisitos de performance:

exactitud, integridad, disponibilidad y continuidad de servicio.

**Modulación AM** Proceso por el que se cambia la amplitud de una onda portadora, para transmitir una onda que lleva un mensaje.

**Modulación (Modular)** Proceso por el que se cambia un parámetro de una onda portadora, para transmitir una onda que lleva un mensaje.

**Núcleo GNSS** El núcleo, que son las constelaciones de satélites de navegación, por ejemplo GPS, GLONASS y Galileo.

**Polarización** La polarización de una antena se refiere sólo a la orientación del campo eléctrico radiado desde ésta.

**Portadora** Para las comunicaciones de radio, cuando se transmite un mensaje (ímplicito en una señal de baja frecuencia), este actúa sobre o modula una señal senoidal de alta frecuencia, llamada portadora.

**Pseudolite** Estación emplazada en tierra para el LAAS, transmite señales GPS, como uno de esos satélites, garantizan y mejoran la disponibilidad del sistema.

## **Radioayudas**

**Terrestres** Estaciones de Radio utilizadas como referencias para la navegación aérea (VOR, DME, ILS y NDB).

<b>Refracción</b>	La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo conforme pasa oblicuamente, de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación; ocurre siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro medio de diferente densidad.
<b>Satélites de Navegación</b>	Satélites miembros de los sistemas de posicionamiento global, tanto el GPS de los Estados Unidos, como el GLONASS Ruso.
<b>Satélites Geoestacionarios</b>	Los satélites geoestacionarios (GEOS) o geosíncronos son satélites que giran en un patrón circular, con una velocidad angular igual a la de la tierra. Permanecen en una posición fija con respecto a un punto específico en la tierra.
<b>Seudodistancia</b>	La distancia entre un usuario y un satélite de navegación, medida por el tiempo de viaje de la señal que contiene varias fuentes de error. Entre estos se tienen: corrimiento de reloj, predicciones de efemérides, retardos ionosféricos y troposféricos.
<b>Subportadora</b>	Es una señal auxiliar utilizada como portadora, para transmitir otra señal de 30 Hz en un VOR.

**Transponder**

Repetidor de radio en el el cielo, de RF a RF. Recibe transmisiones de la tierra y las retransmite a la tierra, despues de la amplificación y con frecuencia cambiada.

## RESUMEN

En la actualidad, la región centroamericana cuenta con un sistema de navegación conformado por estaciones de radioayudas terrestres. Dichas estaciones cuentan con sus limitaciones, entre ellas la cobertura, la navegación directa al destino no es factible, el terreno impide la instalación en algunos lugares, etc.

La tendencia del tránsito aéreo a nivel mundial es de incrementarse. Por lo que será necesario contar con sistemas más eficientes que los actuales, en cuanto a las comunicaciones, navegación, vigilancia y gestión de tránsito aéreo.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en conjunto con sus estados miembros, planea evolucionar de los sistemas actuales a los modernos. Dentro de esta evolución se migrará de los sistemas de navegación basados en radioayudas terrestres a los basados en satélite.

Los nuevos sistemas para la navegación aérea, estarán basados en satélite, debido a la cobertura, factibilidad de usar rutas más directas y la capacidad de poder manejar mayor cantidad de tránsito. Sin embargo, para poder utilizar las señales de satélites de navegación, es necesario mejorar dichas señales por medio de una mejora denominada *aumentación*.

Para Guatemala se propone utilizar la *aumentación* basada en satélite.



## **OBJETIVOS**

### **Generales**

1. Proporcionar los lineamientos teóricos para diseñar un sistema de navegación basado en satélite confiable y seguro para el uso de naves aéreas en el espacio aéreo guatemalteco.
2. Presentar de forma clara los temas de éste informe, con el fin de que cualquier estudiante del área de telecomunicaciones se familiarice fácilmente con ellos.
3. Dar a conocer una bibliografía adecuada del tema y sus diferentes aplicaciones, debido a la poca información existente en la facultad de ingeniería.

### **Específicos**

1. Analizar si el uso de la navegación aérea basada en satélite es conveniente técnicamente para su uso en Guatemala.
2. Dar a conocer los diferentes sistemas de aumentación existentes, ventajas y desventajas de los mismos.
3. Proponer el diseño de un sistema de navegación aérea para Guatemala que cumpla con las normas y reglamentos internacionales.



## INTRODUCCIÓN

La naturaleza tiene ejemplificados algunos sistemas de navegación, en criaturas como insectos, crustáceos y algunas aves, etc. El ser humano ha implementado sistemas de navegación aérea, que funcionan mundialmente. Estos requieren de estaciones de radioayudas terrestres, como lo son las estaciones NDB, DVOR/DME e ILS.

Debido a la constante búsqueda del ser humano, para realizar todos sus procesos de una manera eficiente, es necesario implementar un sistema de mayor rendimiento respecto a las radioayudas terrestres o convencionales. Este es el recomendado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y es llamado GNSS (Sistema de Navegación Global Basado en Satélite).

El presente trabajo de graduación, trata del estudio de la migración de sistema de navegación aérea por radioayudas terrestres, a los basados por satélite en Guatemala/Centroamérica. Es decir, se exponen los principios con los que funcionan las radioayudas, los sistemas de navegación por satélite, los sistemas de aumentación y se propone un diseño genérico de un sistema de navegación aérea por satélite para Guatemala.

Es deseo del autor proporcionarle la información relacionada del tema, de una manera que facilite su fácil comprensión.

# **1. RADIOAYUDAS PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA ( SISTEMAS ACTUALES/CONVENCIONALES )**

## **1.1 Sumario**

Los seres humanos no hemos sido dotados por la naturaleza para navegar sin ningún patrón de referencia. Por ejemplo cuando navegamos por tierra es necesario que contemos con caminos o vías que nos indiquen la dirección y sentido a seguir.

Otras criaturas tienen la posibilidad de navegar dentro del mar y en el espacio aéreo, gracias a que poseen la cualidad de sensor campos magnéticos, tales como las langostas y algunas aves, siguiendo las indicaciones de las líneas de campo.

El ser humano ha podido guiarse a través de artificios como la brújula, desde la antigüedad, para encontrar la dirección a tomar. Desde el siglo pasado la navegación aérea ha podido utilizar sistemas en los que las aeronaves pueden basarse, para llevar un control ordenado del espacio aéreo. Dichos sistemas son los conocidos como radioayudas.

En este capítulo se describen los principios de las radioayudas más comunes, como lo son NDB, DME, VOR e ILS. Una radioayuda es una estación emisora de radio, que emite señales que un piloto aviador puede interpretar, gracias a los instrumentos a bordo de un aeronave, para maniobrar eficientemente.

El objetivo de este capítulo, como punto de partida de la migración a la que se refiere este trabajo de tesis, es presentar los principios de operación con los que funcionan los sistemas de navegación aérea actuales. Sin embargo es importante mencionar, que con este primer capítulo, se intenta familiarizar a todo lector que desconozca de radioayudas.

Los sistemas actuales o convencionales son estaciones terrestres, ubicadas en sitios estratégicos, como por ejemplo en aeropuertos, tal como lo son las radioayudas para aproximación, o en otros sitios como ayudas de ruta.

Con esta breve exposición de radioayudas no se espera que el lector se vuelva un experto en la materia, pero que asimile los conceptos básicos relativos al tema introductorio, para poderle dar continuidad al resto del trabajo.

## **1.2 Radiofaro no direccional NDB ( *Non Direccional Beacon* )**

### **1.2.1 Teoría del funcionamiento**

Un NDB es una estación emisora de radio localizada en un sitio conocido como ayuda a la navegación. Emite señales de radio dentro del rango de baja frecuencia (la cual es llamada a veces onda larga). De acuerdo al Anexo 10 las *frecuencias* asignadas para esta radioayuda son las disponibles en la porción del *espectro* entre 190 kHz y 1750 kHz.

La señal radiada es *modulada* en AM y generalmente es una transmisión de un identificador a 1020 Hz, de dos o tres letras, en código

internacional Morse que posee la estación (por ejemplo GUA para el aeropuerto internacional la Aurora), esta señal es recibida por antenas direccionales en las aeronaves para desplegar la dirección de la estación en un instrumento abordo (Aviónica de un NDB).

Los instrumentos de NDB indican la dirección de la estación emisora y por lo tanto no indican la localización exacta de la aeronave. Para determinar su posición es necesario obtener dos señales de NDB. Las estaciones NDB son indicadas en mapas para la navegación aérea (o bien conocidas como cartas aeronáuticas).

Todos los sistemas electrónicos para la navegación aérea funcionan con el principio de redundancia, en caso un radio transmisor falle, la estación cuenta con otro de redundancia, que usualmente entra en funcionamiento automáticamente.

Una de las mediciones frecuentes para el mantenimiento de esta radioayuda es la medición del coeficiente de modulación, el cual es un indicador de la cantidad de cambio de amplitud (modulación) presente en una onda AM. Matemáticamente es:

$$m = E_m / E_c$$

en donde:  $m$  = coeficiente de modulación

$E_m$  = Amplitud pico del voltaje de la forma de onda de salida modulada (voltios).

$E_c$  = Amplitud pico del voltaje de la portadora no modulada (voltios).

### **1.2.2 Componentes que lo conforman**

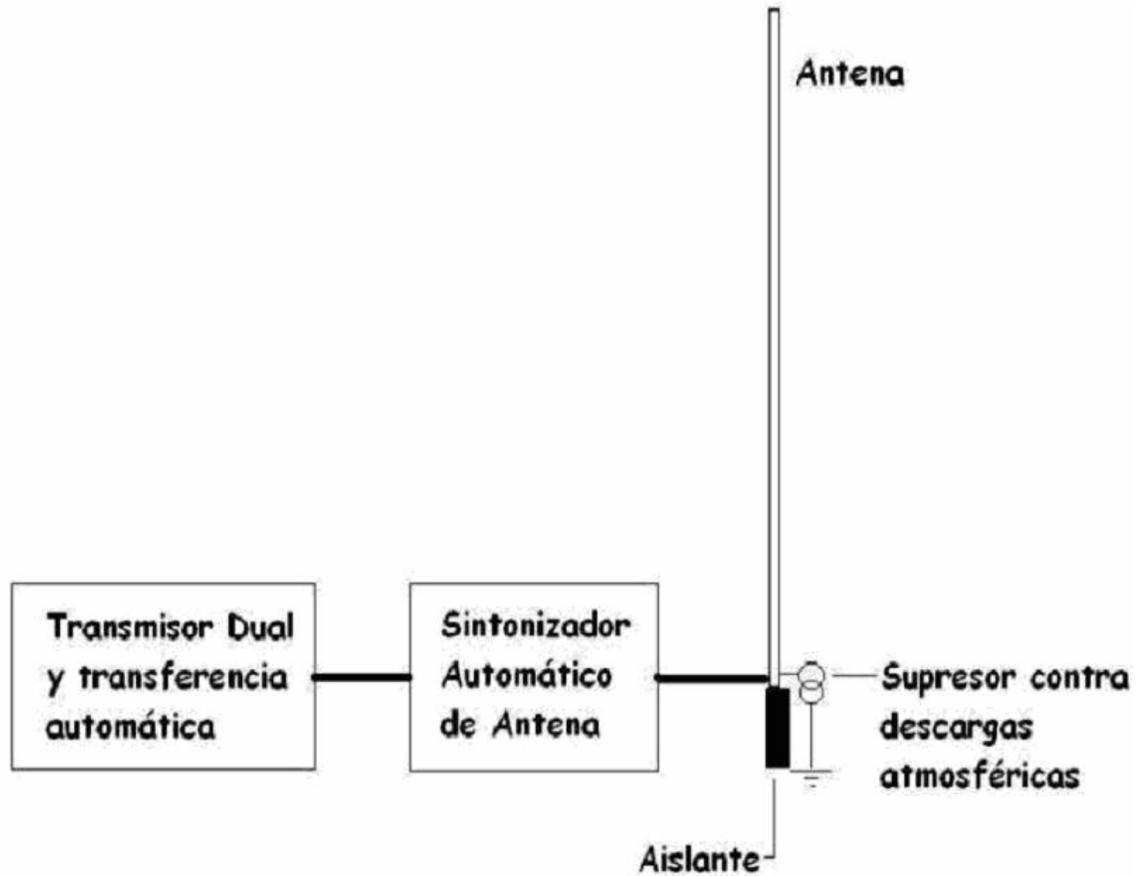
Desde el punto de vista general, una estación NDB esta  
Compuesta por:

- Un transmisor dual (que incluye transferencia automática). O sea un primer transmisor conectado a la antena y funcionando y otro transmisor en reserva, que entraría a trabajar en caso el primero tuviera alguna falla.
- Un sintonizador automático de antena, el cual es un dispositivo que permite el ajuste del largo eléctrico de la antena a la longitud de onda de la portadora que se necesita transmitir, que puede resultar de mucha utilidad cuando las condiciones del tiempo varían mucho y afectar la eficiencia de la antena.
- Una antena con la mínima relación de onda estacionaria (ROE = mínimo), es decir con el menor desacoplamiento entre la impedancia de carga y la impedancia característica de la línea de transmisión.

### **1.2.3 Diagrama a bloques**

El diagrama a bloques se presenta en la siguiente figura, el transmisor dual esta compuesto de un equipo conectado a la antena y transmitiendo, mientras que el otro equipo se encuentra en modo de espera o reserva. En caso falle el primero, el de reserva entrará a funcionar por medio de la transferencia automática.

**Figura 1. Diagrama a bloques del NDB**



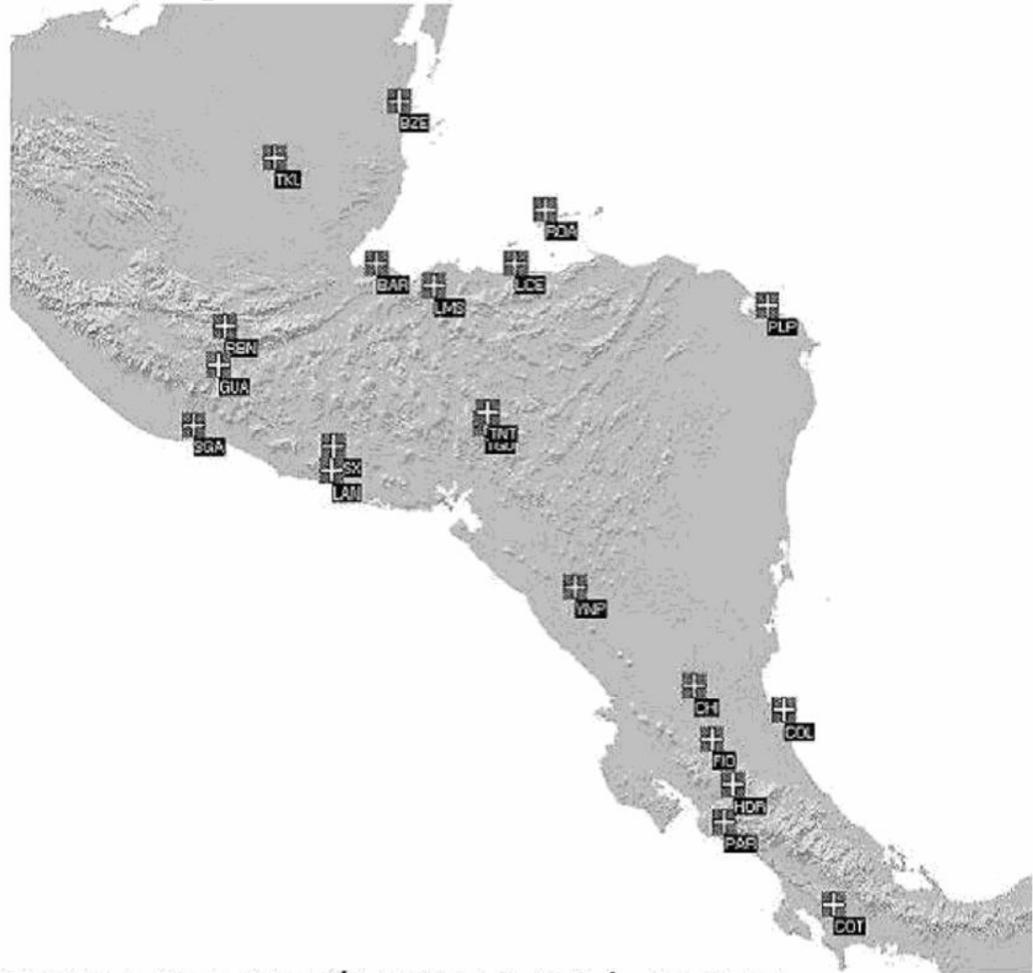
#### **1.2.4 Red de NDB en Guatemala**

Parte de las radioayudas guatemaltecas son mantenidas por la organización *COCESNA*, las estaciones NDB aparecen en la figura 2. Como se puede ver en el diagrama el número total de radioayudas NDB en Centroamérica son 21.

Este tipo de radioayuda es uno de los más antiguos y desde el punto de vista de la estación terrena la más sencilla, sin embargo es uno de los primeros pasos que se tomó en la coordinación de la navegación

aérea, basada por instrumentos y sin ésta última no se podría dar el servicio al tráfico aéreo del presente.

**Figura 2. Red NDB en Centroamérica**



**Fuente: Presentación power point de Cocesna**

### **1.3 Equipo de medida de distancia DME ( *Distance Measuring Equipment* )**

#### **1.3.1 Teoría del funcionamiento**

En términos generales el sistema DME opera de la siguiente manera: Un par de pulsos electromagnéticos, separados por un tiempo específico, son emitidos por una nave aérea (esto es lo que se conoce como la interrogación), los cuales son recibidos por una estación terrena, cuyo receptor es conocido como transpondedor o respondedor.

Luego de haber sido procesada la información que se decodificó de los pulsos enviados, inicialmente por la aeronave, la estación terrena transmite como respuesta un par de pulsos, separados por el mismo intervalo de tiempo como en la interrogación. Cada canal o estación terrena tiene asignadas dos frecuencias, una de interrogación y otra de respuesta, que difieren entre sí en 63MHz.

El tiempo necesario para efectuar el viaje de ida y vuelta de este intercambio de señales es medido por una unidad aérea DME (Aviónica DME) y es calculada de esa manera la distancia de la aeronave a la estación terrena. Puesto que el transpondedor, en la estación terrena, introduce un retardo se tendrá:

$$d = (t - \tau) c / 2$$

en donde  $d$  = La distancia de la aeronave a la estación terrena

$c$  = La velocidad de la luz

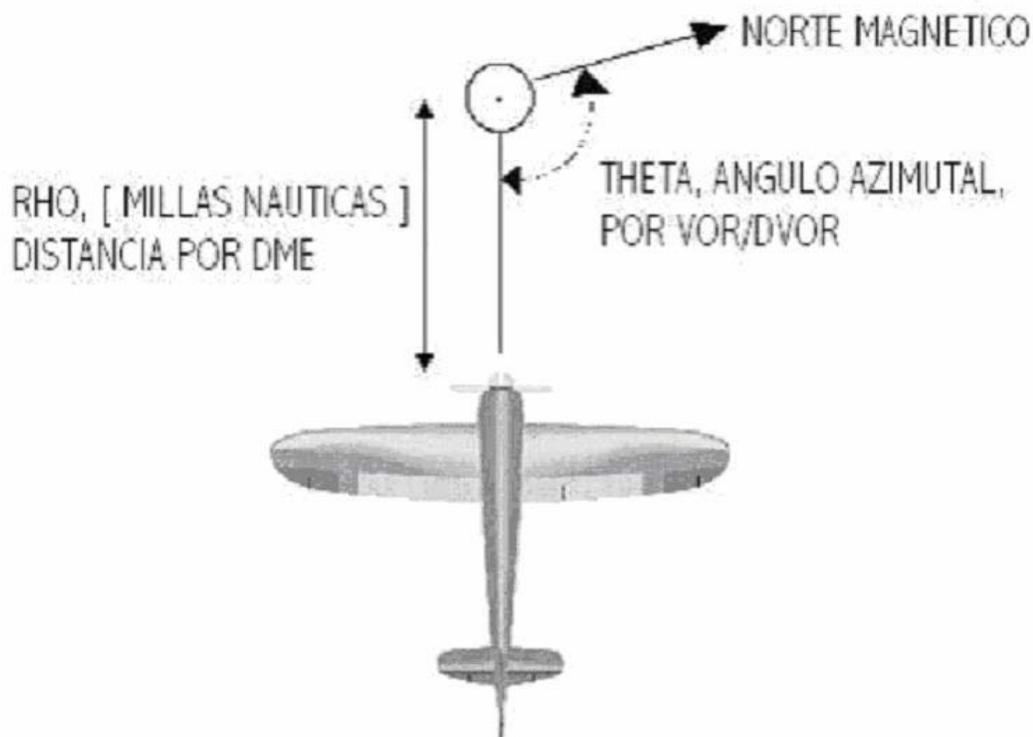
$\tau$  = Retardo introducido por el transpondedor que por razones de compatibilidad es de 50  $\mu$ s

### **1.3.2 Características principales**

El sistema DME mide la distancia de una aeronave a la estación terrestre DME y proporciona este dato al piloto, directamente en un instrumento indicador abordo, en millas náuticas. Forma parte del sistema de navegación RHO-THETA conjuntamente con el sistema VOR que proporciona información de azimut, tal como se ilustra en la figura 3.

Una característica importante es la de que el equipo interrogador abordo, genera sus impulsos de interrogación a una frecuencia aleatoria, para que no exista confusión con respuestas que no corresponden a las interrogaciones de la misma aeronave.

**Figura 3. Sistema de navegación Rho-Theta**



### **1.3.3 Capacidad del sistema**

El equipo de tierra puede ser utilizado simultáneamente por varias aeronaves, porque cada equipo abordo tiene la capacidad de distinguir entre todas las respuestas emitidas por la estación terrestre (radioayuda terrestre) y la respuesta que realmente le corresponde.

Si se tuviese por ejemplo una radioayuda, de este tipo, en la que se incrementa el número de aeronaves que la utilizan, en forma indefinida, se tendría el problema de que el intervalo de tiempo de las respuestas se saturaría, lo que aumentaría la posibilidad de que el equipo abordo confundiese una respuesta y dar una lectura errónea de distancia.

Para evitar la posibilidad de error la radioayuda esta dotada de un detector que limita la cantidad de respuestas a un máximo de 2700 por segundo, lo que equivale a 100 aeronaves. En el caso de que existieran más de 100 aeronaves interrogando, la estación terrena no respondería a aquellas cuyas interrogaciones llegaran con una menor intensidad de señal a la estación.

#### **1.3.4 Radiofrecuencias y número de canales**

La radioayuda DME funciona en la banda de frecuencias de 960 a 1215 MHz (UHF), con una separación de canales adyacentes (otras estaciones) de 1 MHz. Cada estación tiene asignadas dos frecuencias, una para interrogación y otra para respuesta, las cuales están separadas por 63 MHz, según las normas proporcionadas por la OACI en su documento Anexo 10, volumen 1.

Debido a que se utiliza un par de frecuencias por estación, dentro de la banda correspondiente, se tiene como resultado un total de 126 canales. Pero para efecto de aumentar el número de canales se introducen dos tipos de codificación en los impulsos, lo que aumenta el número de canales a 252 en la banda autorizada.

Los canales han sido ordenados de 1 a 126 y en dos series o modos X y Y. Con el objeto de simplificar el trabajo efectuado por los pilotos, para hacer la selección de canal, se ha asignado otro canal correspondiente a la radioayuda en VHF (VOR e ILS) al canal DME. Así cuando se selecciona un canal DME también se selecciona el canal de la radioayuda correspondiente en VHF a la cual esta asociada la estación de UHF.

### **1.3.5 Cifrado de los impulsos**

Con el propósito de poder distinguir entre los modos X y Y, de los tipos de canales, según punto anterior, y de discriminar cualquier tipo de interferencia en la banda, se ha hecho el siguiente artificio: Cada impulso de interrogación o respuesta está compuesto en realidad por un par de pulsos.

El cifrado o codificación de los canales, se hace asignando una separación entre impulsos definida. Para el modo X las interrogaciones y respuestas tienen una separación de 12 microsegundos. Para el modo Y las interrogaciones tienen una separación de 36 microsegundos y las respuestas una de 30 microsegundos.

### **1.3.6 Retardo de tiempo**

La estación terrestre está provista de un circuito descifrador, de tal forma que el transpondedor sólo se activa cuando se reciben parejas de impulsos de características apropiadas, cada impulso debe tener el ancho predeterminado (3.5 microsegundos) y la separación entre ambos debe ser la correspondiente al modo de canal.

El DME introduce un tiempo de retardo entre la emisión de interrogaciones y la recepción de sus correspondientes respuestas, tal como se expresa en la siguiente ecuación. Dicho tiempo está normalizado a 50 microsegundos. Para el cálculo de la distancia este tiempo es descontado del que se mide en la aeronave.

### **1.3.7 Cobertura**

La cobertura suele estar comprendida entre 75 N.M. y 200 N.M. Esta depende de la potencia del equipo, la ganancia de la antena, la altitud de la aeronave, el entorno, línea vista entre la estación y la aeronave.

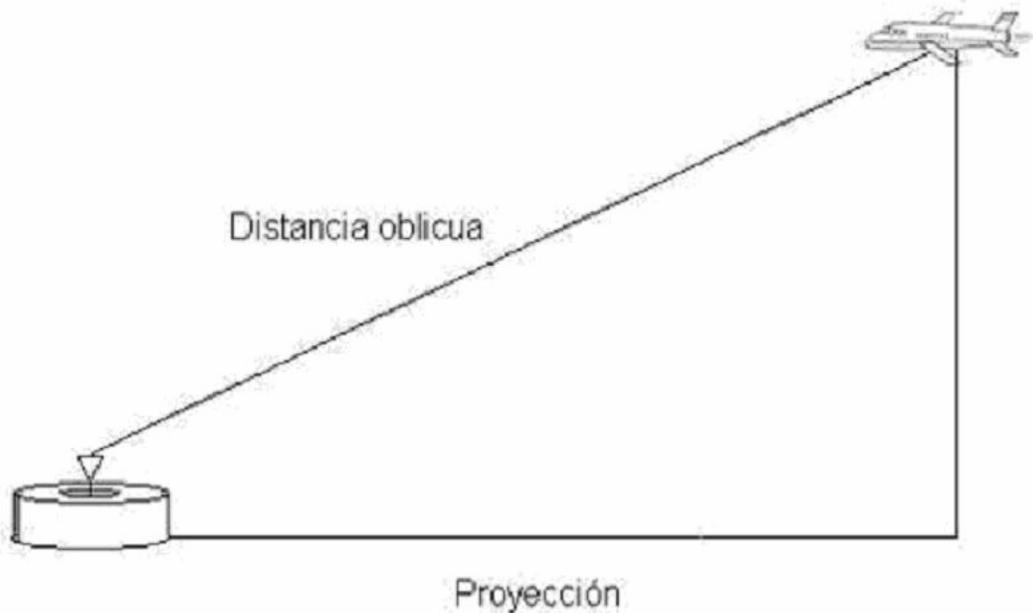
### **1.3.8 Precisión**

En el rango de 0 a 200 N.M. de separación entre el transpondedor y la aeronave, el error que se comete en el cálculo de la distancia es aproximadamente de 0.5N.M. ó 3%. Dicho error se comete debido a la medición que hace el equipo de la distancia oblicua entre la estación terrestre y la aeronave.

Si se considera una imagen instantánea del sistema, se forma un triángulo rectángulo, en el que la estación DME se encuentra cerca de un ángulo no rectángulo, y la aeronave se localiza cerca del otro ángulo no rectángulo. La distancia oblicua quedaría representada como la hipotenusa.

Sin embargo la distancia de verdadero interés es la proyección sobre el terreno, como se muestra en Figura 4. Luego se tiene que para distancias grandes la diferencia tiende a ser despreciable y para distancias cortas éste valor puede ser muy significativo.

**Figura 4. Diferencia entre distancia oblicua y proyección sobre el terreno**



Por ejemplo si se tiene una aeronave volando a una altura de 35,000 pies de altura (5.8 N.M.), el instrumento del tablero DME indicaría una distancia a la estación terrestre de 90 N.M, pero utilizando trigonometría se tiene que la proyección es de 89.8 N.M., un error de 0.2 N.M.

En otro caso donde la aeronave pase sobre la radioayuda, se tiene el máximo error de 5.3 N.M.

### **1.3.9 Tiempo a la estación y velocidad con respecto a la tierra**

Los indicadores abordo suelen tener la posibilidad de entregar a los pilotos la información de tiempo estimado a la estación en minutos o

la velocidad respecto a la tierra. Lo cual es basado en la información primaria que ofrece el DME, donde esta es la distancia.

### **1.3.10 Equipo interrogador DME**

El interrogador DME es la parte del sistema DME que poseen las aeronaves a bordo, este desempeña tareas como efectuar las interrogaciones al transpondedor en tierra, calcular el tiempo en el que son respondidas las interrogaciones efectuadas, presentar la información en la aeronave a través de los indicadores DME y presentar la identificación de la estación terrestre.

Para garantizar la continuidad del servicio se provee de redundancia de equipos a bordo, es decir, dos interrogadores, dos antenas y dos indicadores de distancia.

### **1.3.11 Descripción del diagrama a bloques del sistema DME y del interrogador**

Antena

La antena instalada en la aeronave es una antena acoplada en la parte inferior de la aeronave, esta diseñada para trabajar en la banda correspondiente y produce un diagrama de radiación omnidireccional, para un sistema dual (redundante) deben haber dos.

Dicha antena se utiliza tanto para emitir interrogaciones, como para recibir respuestas provenientes de la estación terrestre. Las señales recibidas son enviadas al interrogador para el procesamiento, cuyo resultado se traslada al indicador DME.

### Panel de control de navegación VHF/DME

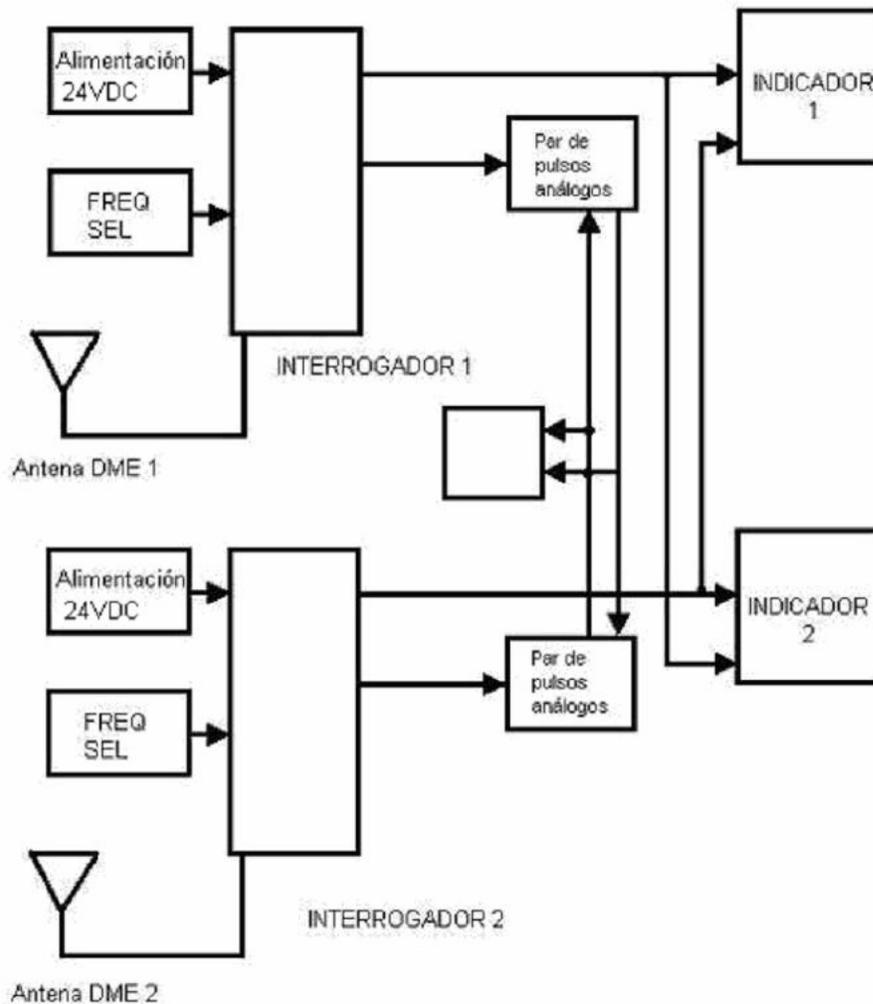
Este contiene los componentes que controlan la sintonía apareada de selección de frecuencias para el sistema VOR y DME. En realidad lo que se selecciona es la frecuencia de la estación VOR (radioayuda VHF) y automáticamente quedan elegidas las frecuencias de interrogación y de respuesta para el sistema DME.

### Indicador DME

El indicador de distancia DME, presenta la información de distancia en millas náuticas (N.M.) y generalmente es un indicador dual. Cuando no se recibe información correcta o válida por el interrogador, el indicador no muestra nada en pantalla.

En la Figura 5 aparece el diagrama a bloques del sistema DME instalado en la aeronave, donde se observa que posee una redundancia completa, de antenas, fuentes de alimentación, interrogadores, indicadores, etc.

**Figura 5. Diagrama a bloques simplificado del DME instalado en la aeronave**



La redundancia se utiliza para garantizar que en caso falle alguno de los eslabones, de cualquiera de los dos sistemas (1 ó 2) exista la posibilidad de seguir midiendo la distancia de la estación terrena a la aeronave en forma confiable.

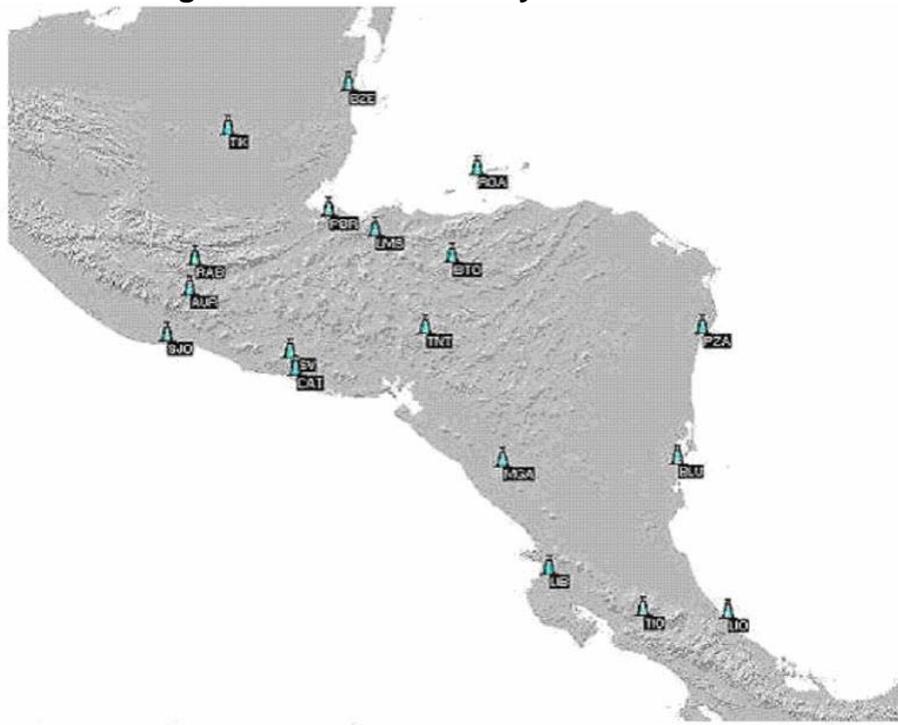
Es preferible presentar el diagrama a bloques de estos equipos porque existen variaciones en el diseño, a un nivel más específico,

además las especificaciones técnicas de éstos son regularmente manuales completos, que van más allá del objetivo de éste capítulo.

### 1.3.12 Red de equipos DME en Guatemala

Debido a que el sistema DME es parte del sistema de coordenadas RHO-THETA, tiene su estación terrestre en el mismo sitio que el VOR. Algunas de las estaciones DME/VOR instaladas en Centro América aparecen la figura 6:

**Figura 6. Red de radioayudas DME/VOR**



**Fuente: Presentación power point de Cocesna**

## **1.4 Radiofaro omnidireccional por VHF VOR ( *Very high frequency OmniRange* o *VHF Omnidirectional Radio Range* )**

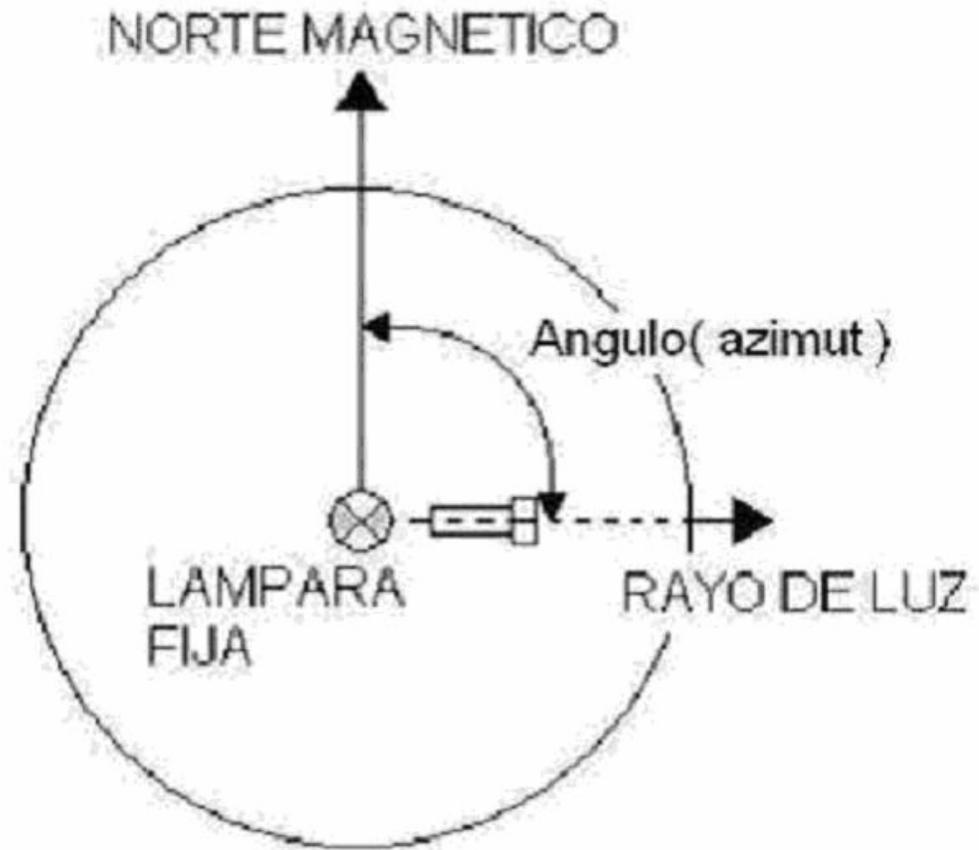
### **1.4.1 Teoría del funcionamiento**

VOR es la abreviatura del inglés: “*Very high frequency Omni directional Range*” que traducido a nuestra lengua natal es radiofaro omnidireccional de frecuencia muy elevada. Como se explicó anteriormente en el punto 1.3.2 el sistema VOR provee información del ángulo entre la dirección de vuelo de una aeronave y el norte magnético, sus señales son provistas en VHF.

Esta radioayuda fue introducida y es recomendada por la OACI en el Anexo 10, como guía de tráfico aéreo para distancias cortas y largas. La banda de frecuencia que es utilizada para este sistema va de los 108 MHz a 118 MHz.

La analogía que comúnmente se utiliza para la explicación de una radioayuda VOR, es con rayos de luz (como un faro). En esta analogía (Véase Figura 7) se tiene una lámpara que produce un rayo de luz que rota, y se tiene una lámpara fija (sin movimiento), visible en todas las direcciones, que se enciende cada vez que el rayo de luz apunta hacia el norte magnético.

Figura 7. Analogía para comprensión del VOR



Si se hace girar la lámpara a una velocidad angular constante, digamos 1 rpm, es posible entonces que un observador fijo por medio de un cronómetro, mida el tiempo transcurrido entre el instante en el que se enciende la luz fija y el instante en que se ve el rayo de luz. Entonces el intervalo de tiempo entre ambos instantes (X) es proporcional al ángulo que separa al observador del norte magnético con respecto al rayo de luz, lo que indica una proporción como lo muestra la siguiente ecuación.

$$X \text{ (segundos)} / 60 \text{ (segundos)} = \text{ángulo (grados)} / 360 \text{ (grados)}$$

Por ejemplo para un intervalo de 15 segundos, utilizando la ecuación, el observador estimaría una posición azimutal de 90 grados, es decir que se encuentra al este del punto dónde se origina el rayo de luz que rota, lo cual corresponde a la instantánea de la Figura 7.

#### **1.4.2 Componentes que lo conforman**

Técnicamente el objeto de una estación VOR es la de emitir señales de VHF, que transporten dos componentes de 30Hz, una de referencia y otra variable. Una que es radiada en todas direcciones, de fase constante y otra cuya fase es variable que depende del radial para el cual se encuentre el observador o aeronave. Entendiendo como radial una línea recta que parte del centro de emisión del rayo de luz o radiación direccional que rota, hacia el punto donde se encuentra el observador.

Debido a que no se puede *modular* una sola señal portadora, simultáneamente por dos señales de la misma frecuencia y luego recuperar ambas señales, la estación terrestre debe radiar una portadora y una subportadora.

Inicialmente fue implementada la radioayuda VOR, luego como una mejora a la precisión del sistema se implementó el DVOR. El DVOR aprovecha el efecto Doppler. Recordando que este efecto se da cuando hay una fuente en movimiento, de frecuencia constante, que emite alguna señal audible o de radiofrecuencia, y es percibida por un observador con una frecuencia variable.

### VOR CONVENCIONAL:

Para el VOR convencional o solamente VOR la señal de 30 Hz variable se obtiene haciendo girar un patrón de radiación direccional, a una velocidad de 30 revoluciones por segundo. Dicho patrón rotativo se superpone en el espacio a la portadora radiada omnidireccionalmente y de esta forma se recibe en el instrumento abordo una señal modulada en amplitud de 30 Hz, con fase dependiendo del azimut donde se localice la aeronave.

La señal de referencia es de 30 Hz que modula en frecuencia la *subportadora* de 9960 Hz con un desplazamiento de frecuencia de 480 Hz. La señal *portadora* es modulada en amplitud por la subportadora. Así es como se obtiene enviar dos señales de la misma frecuencia a través del VOR y ser decodificadas correctamente por el instrumento abordo. Expresado como fórmula en la siguiente ecuación:

$$V = V_0 \sin \omega t \left[ 1 + m_1 \cos(\Omega t - \theta) + m_2 \cos(\Omega' t + k \sin \Omega t) + m_3 \cos \Omega'' t + m_4 \cos \Omega''' t \right]$$

Donde:

$\Omega$  es la frecuencia de 30 Hz

$\Omega'$  es la frecuencia subportadora 9960 Hz

$\Omega''$ ,  $\Omega'''$  son las frecuencias de las bandas de identificación por voz

$\Omega''$  para banda de la voz 300-3000 Hz;  $\Omega'''$  para identificación 1020 Hz

$m_1$  a  $m_4$  son las profundidades de modulación de las bandas laterales:

$$m_1 = m_2 = m_3 = 30\%, \quad m_4 \leq 10\%$$

$k$  es la razón de la desviación de frecuencia de la subportadora:  $16 \pm 1$

$\theta$  es el cambio de frecuencia que caracteriza el azimut.

$\omega$  es la frecuencia angular de la portadora de la estación.

### VOR DOPPLER:

Para el sistema VOR Doppler los papeles de las señales de 30 Hz son intercambiados, es decir que la señal que modula en amplitud a la portadora es la señal de referencia, mientras la señal variable de 30 Hz esta contenida como modulación de frecuencia en la subportadora de 9960 Hz.

La antena central radia en forma omnidireccional a la portadora y es modulada en AM por la señal de referencia de 30 Hz. A cierta distancia se encuentra un radiador de *banda lateral* que puede imaginarse rotando en una trayectoria circular. La frecuencia de la banda lateral esta desplazada +9960 Hz y -9960 Hz con respecto a la frecuencia de la portadora. Con el radiador de banda lateral rotando a 30 revoluciones por segundo se obtiene la modulación de frecuencia dependiente del azimut de la subportadora debido al efecto doppler.

La ecuación del DVOR es:

$$V = V_0 \cos \omega t \left\{ 1 + m_1 \cos(\Omega_1 t + \psi_1) + m_2 \cos[\Omega_2 t + k \sin(\Omega_3 t + \psi_2)] \right\}$$

Donde:

$\omega$  es la frecuencia angular de la portadora

$\Omega_1$  es la señal de 30 Hz que se toma como referencia y el término donde esta, modula a la portadora en AM, con un porcentaje de modulación de un  $m_1=30\%$ .

$\Omega_2$  es la frecuencia central de la subportadora de 9960 Hz

$k$  es el coeficiente de modulación de frecuencia  $k=16$

$\Omega_3$  es la señal de 30 Hz variable

### 1.4.3 Diagrama a bloques

Para el VOR convencional se presenta el siguiente diagrama a bloques en la Figura 8. El goniómetro es un dispositivo que cuenta con dipolos cruzados, que producen el patrón de radiación rotativo a 30 revoluciones por segundo, lo que hace la señal de 30 Hz variable.

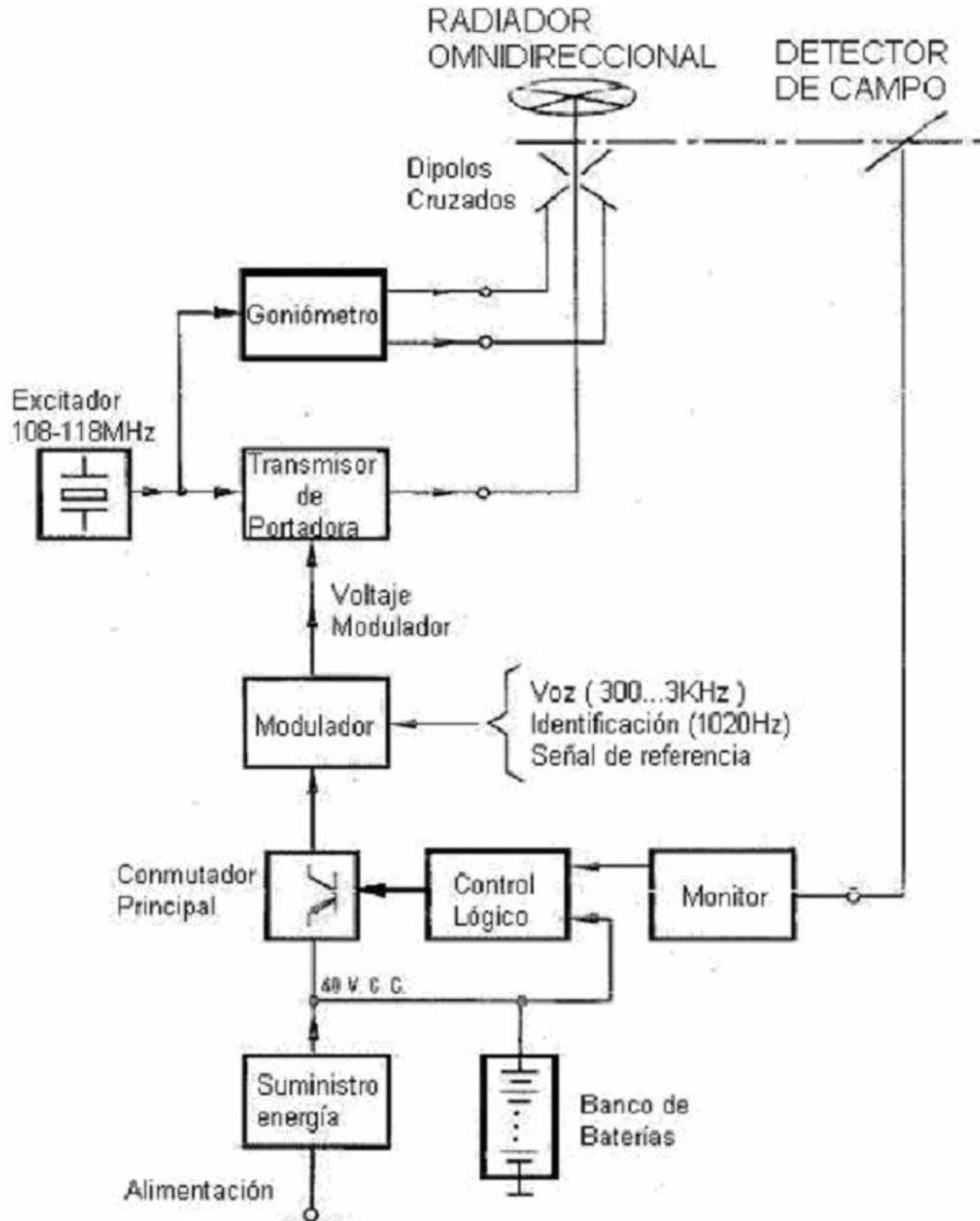
El sintetizador de frecuencias funciona a base de cristal por su estabilidad. El modulador esta alimentado por las siguientes señales:

- Referencia
- El código de identificación que corresponde a tres letras, modulado en código Morse, para cada radiofacilidad, tal como se muestra en la Figura 6, por ejemplo RAB, AUR, etc.

El monitor a través del detector de campo, tiene el objeto de chequear continuamente la precisión de la señal de azimut proporcionada por el VOR. Si el monitor hace un chequeo sobre la señal y esta no es correcta, cuando se tiene un sistema dual (con redundancia), el monitor cambia el equipo que esta funcionando a pasar como de reserva, y al que esta de reserva lo cambia al aire. En caso el monitor detecta que ambos equipos proporcionan señales no correctas, la radiofacilidad completa deja de funcionar, como una medida de seguridad.

El conmutador principal se construye a través de semiconductores, tales como transistores que trabajan en corte y saturación, que controlan cual de los equipos se conecta a las antenas, es decir al aire, y cual pasa a ser de reserva.

Figura 8. Diagrama a bloques del VOR



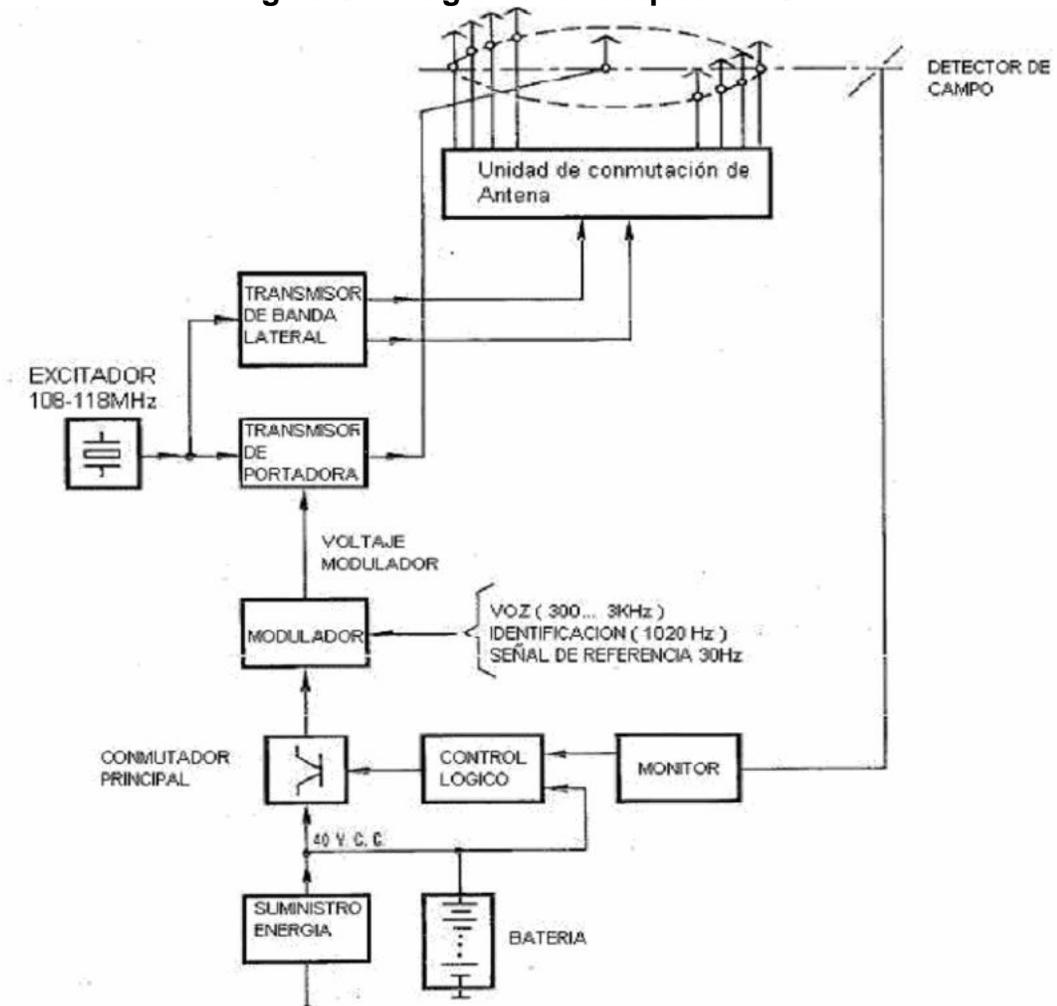
**Fuente: Revista comunicaciones eléctricas Vol. 50/4**

El VOR doppler o DVOR en su diagrama a bloques, de la Figura 9, tiene la diferencia de una unidad de conmutación de antena, la cual

efectúa la simulación de rotación del radiador de banda lateral conectando sucesivamente grupos de antenas específicos, en su momento oportuno. Dicha conmutación se hace por medio de transistores en corte o en saturación.

Es importante mencionar que el DVOR, produce resultados más precisos, bajo condiciones de propagación adversas en comparación al VOR, debido a que obstáculos grandes tales como árboles, montañas, etc. pueden producir errores en la indicación del instrumento abordo. Dichos errores son producto de que en la entrada del receptor se capta la información azimutal correcta y la información azimutal que proviene del obstáculo reflector.

Figura 9. Diagrama a bloques DVOR



Fuente: Revista comunicaciones eléctricas Vol.50/4

La mejora en la precisión del instrumento abordo, cuando se utiliza una radiofacilidad DVOR, es debida a la modulación de frecuencia de la señal variable, la cual es la que contiene la información azimutal, por lo que no es susceptible a interferencias que afecten la amplitud de la señal.

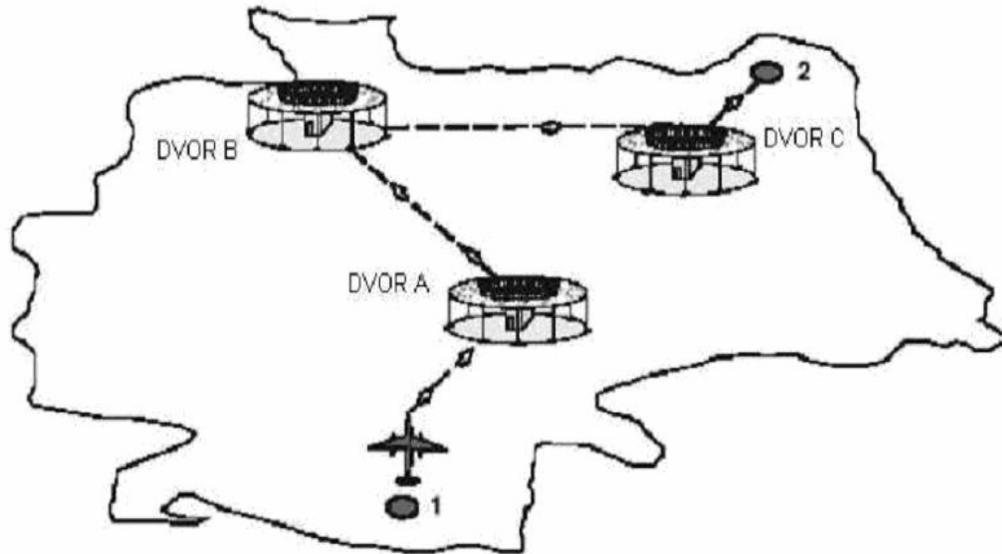
#### **1.4.4 Red de aerovías VOR en Guatemala**

Las aerovías son conformadas por radiofacilidades VOR y DVOR, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 10, tomando un área geográfica hipotética. Los radiales de cada estación VOR o DVOR se interconectan con los radiales de otras estaciones, lo que da como resultado trayectorias definidas para el control ordenado del tráfico aéreo. Sin embargo no hay rutas directas entre todos los aeropuertos, lo que produciría un ahorro de combustible para las aerolíneas.

En el ejemplo la aeronave puede viajar del aeropuerto 1 al 2, gracias a la existencia de tres radiofacilidades VHF (en este caso DVOR). En Centroamérica las aeronaves pueden viajar con seguridad debido a la red de radioayudas fijadas en la Figura 6, las cuales son VOR y DME, simplemente cambiando la estación VOR/DME sintonizada.

Sólo como referencia, para considerar la importancia de las radioayudas para la navegación aérea, en países con un alto grado de densidad de tráfico aéreo, se puede mencionar que en el año 1960 existían aproximadamente 50 estaciones terrestres de este tipo en el estado de Texas.

**Figura 10. Aerovías formadas por radioayudas VOR**



**Fuente: Manual técnico DVOR 432, Airsys Navigation Systems**

## **1.5 Equipo del sistema de aterrizaje por instrumentos ILS ( *Instrument Landing System* )**

### **1.5.1 Teoría del funcionamiento**

El sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS) facilita al piloto de una aeronave la aproximación y aterrizaje en un aeropuerto con condiciones de baja visibilidad. La utilización de este sistema disminuye las interrupciones de servicio debido a condiciones meteorológicas adversas, aumentando así la capacidad de manejo de tráfico de un aeropuerto.

El ILS se compone de localizador, senda de descenso( *Glide Slope* ), radiobalizas(DME), más el equipo de control y supervisión necesario. Otras radioayudas que pueden instalarse para la utilización conjunta con un ILS son el radiofaro no direccional o radiofaro de localización (NDB) y el equipo medidor de distancia (DME), ambos mencionados previamente en este capítulo.

El sistema ILS radia frecuencias de la banda VHF y la banda UHF, para su localizador ( *Localizer* ) y para su senda de descenso ( *Glide Slope* ).

### **1.5.2 Diagrama a bloques**

Como el sistema ILS esta compuesto de una ayuda horizontal (localizador) y de una ayuda vertical (senda de descenso), su diagrama de bloques estaría conformado por una radioayuda que radia en VHF y otra que radia en UHF.

Como se recordará los sistemas aeronáuticos deben garantizar la confiabilidad de los sistemas, por lo que cada una de las ayudas, vertical como horizontal, utilizan el concepto de redundancia. Es decir cada una de ellas, opera con un equipo transmitiendo al aire y otro como reserva.

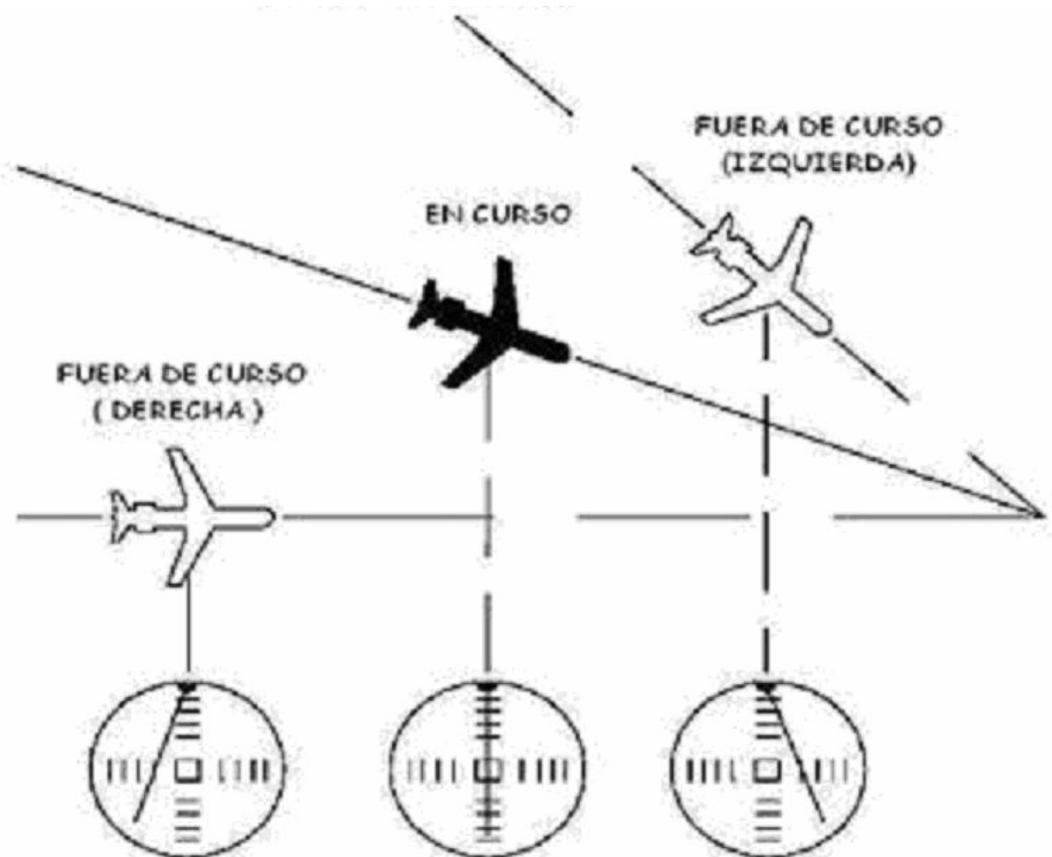
El diagrama generalizado de cómo debe estar situada cada una de las partes del localizador, se ilustra en la figura 12. Para lo correspondiente a la senda de descenso, aparece en la figura 14.

### 1.5.3 Componentes que lo conforman

#### EL LOCALIZADOR

El localizador proporciona un camino de señales de radio a lo largo del eje de la pista, en la dirección que la aeronave se aproxima. Este guía al piloto mediante el desplazamiento horizontal de una aguja en un medidor diferencial (de cero central) denominado CDI (Indicador de Desviación de curso) que le señala: Volar a la derecha, volar hacia la izquierda o en curso, como lo muestra la figura 11.

**Figura 11. Indicación del localizador a la aeronave**



Fuente: Manual técnico Wilcox Mark 20A, Airsys ATM

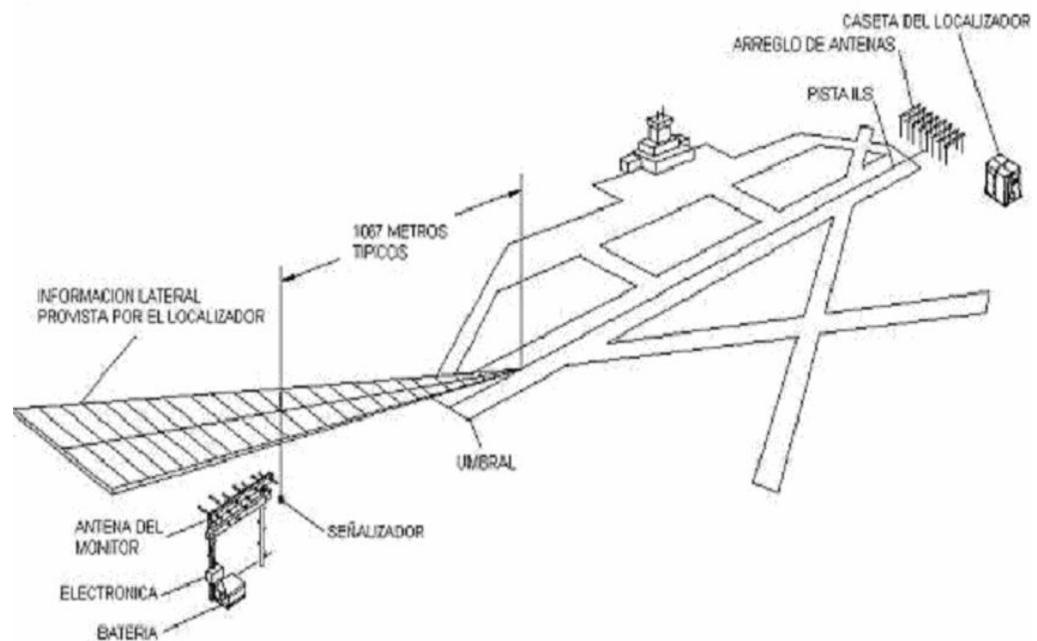
El localizador usa señales de VHF como información de guía, que radia a través de un arreglo de antenas *polarizadas* horizontalmente, con el propósito de extender la pista con señales de radio. Dicha información de guía está modulada por medio de dos señales, una de 90 Hz y otra de 150 Hz, dentro de la banda de frecuencias de 108 a 112 MHz según la recomendación de la OACI en su documento Anexo 10.

El localizador esta compuesto por una caseta, equipo transmisor, sistema radiante de *polarización* horizontal, equipo de supervisión y equipo de control. El sistema radiante (el arreglo de antenas) se ubica normalmente en la prolongación del eje de pista a unos 300 m del extremo de la misma. La caseta del localizador regularmente se sitúa fuera del eje entre los 80 y 100 m de distancia con respecto a éste (ver Figura 12).

El rumbo del localizador se obtiene como resultante de los diagramas de radiación del sistema radiante (arreglo de antenas). Para producir las indicaciones de volar a la derecha, volar a la izquierda, en el instrumento de la aeronave, durante la fase de aterrizaje, se utilizan dos tonos de modulación de 90 y 150 Hz. Si se vuela a la derecha del eje de la pista predomina la señal de 150 Hz, pero si se vuela a la izquierda del eje de la pista predomina la señal de 90 Hz.

El eje de la pista (eje de rumbo o eje del localizador) está definido por la igualdad de modulación de ambos tonos sobre la señal portadora.

**Figura 12. Partes del localizador**



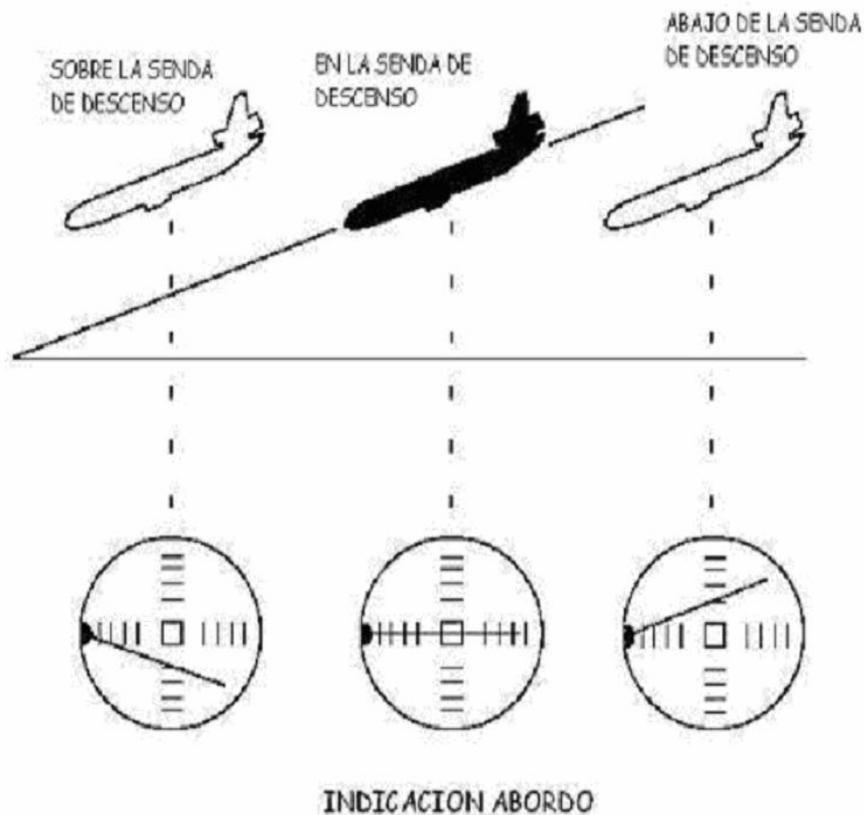
**Fuente: Manual técnico Wilcox Mark 20A, Airsys ATM**

### SENDA DE DESCENSO

La senda de descenso emite un diagrama de radiación que proporciona una trayectoria de descenso, a lo largo del rumbo definido por el localizador. En otras palabras define el máximo y el mínimo del ángulo de descenso para el aterrizaje.

En el campo radiado por las antenas predomina la señal de 150 Hz por debajo del ángulo de descenso y la de 90 Hz por encima, siendo la trayectoria de descenso la que se forma por los puntos donde las señales de 90 y 150 Hz tienen igual nivel.

**Figura 13. Indicación de la senda de descenso a la aeronave**



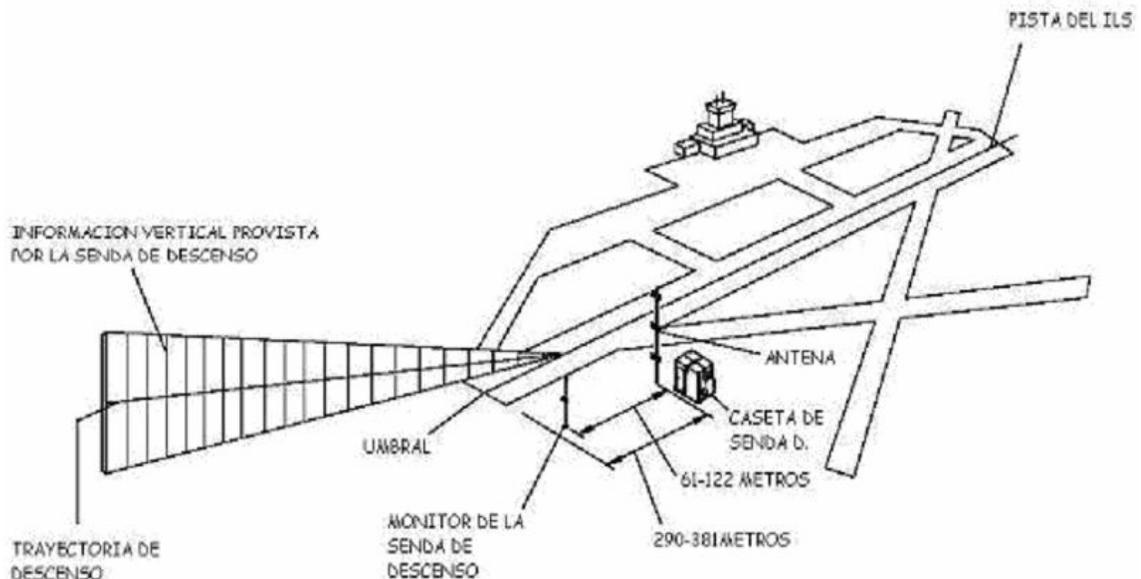
**Fuente: Manual técnico Wilcox Mark 20A, Airsys ATM**

A diferencia del localizador la senda de descenso no emite ninguna señal de identificación. La banda de frecuencias asignada es la de 329 a 335 MHz en el espectro de UHF.

En el equipo abordo se dispone de una aguja horizontal que indica al piloto el ángulo de descenso. Al igual que en el caso del localizador el piloto volará según le indique la aguja del instrumento. Es decir, si la aguja está desplazada hacia arriba, significa que la aeronave se encuentra volando demasiado bajo, para lo cual predomina la señal de

150 Hz, y el piloto deberá hacer la corrección del descenso y centrar la aguja para el ángulo dentro del límite.

**Figura 14. Senda de descenso instalada en un aeropuerto**



Fuente: Manual técnico Wilcox Mark 20A, Airsys ATM

## 1.6 Limitaciones de los sistemas convencionales

Como la base de cualquier investigación científica o estudio, debe tomar como punto de partida el método científico. Recordando que éste, en una forma simple está compuesto de:

- Planteamiento o identificación del problema
- Hacer observaciones
- Planteamiento de la hipótesis
- Conformación de una teoría

Para hacer las cosas de la manera más clara posible, el planteamiento o identificación del problema, es la pregunta que se hace acerca de lo que se estudia.

Cuando se realizó la planificación de éste trabajo, específicamente en el marco conceptual, como conclusión, se hizo la siguiente pregunta: ¿Es posible implementar un sistema de navegación aérea basado en satélite en Guatemala?

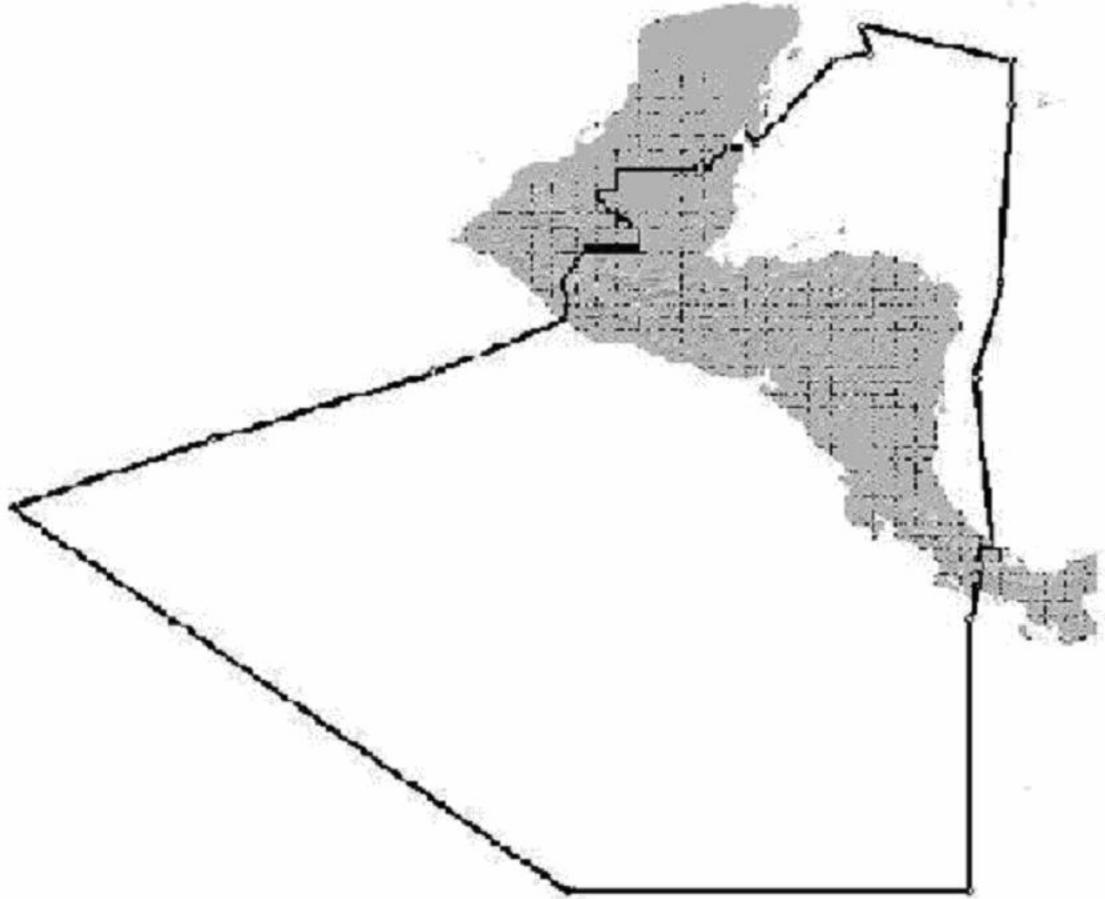
En éste último punto del capítulo, se proseguirá con las observaciones de los sistemas presentes de navegación aérea. Dentro de las observaciones podemos citar:

- Funcionamiento de los sistemas presentes (de lo que ha tratado todo el capítulo).
- Limitaciones, de las que se hará mención a continuación.

Dentro de las limitaciones de los sistemas convencionales o presentes, para la navegación aérea, se tienen las siguientes:

- Cobertura
- Costo de la inversión inicial
- Mantenimiento dificultoso de las radioayudas obsoletas.
- Confiabilidad

**Figura 15. FIR centroamericana**



**Fuente: Presentación de Cocesna**

### **Cobertura**

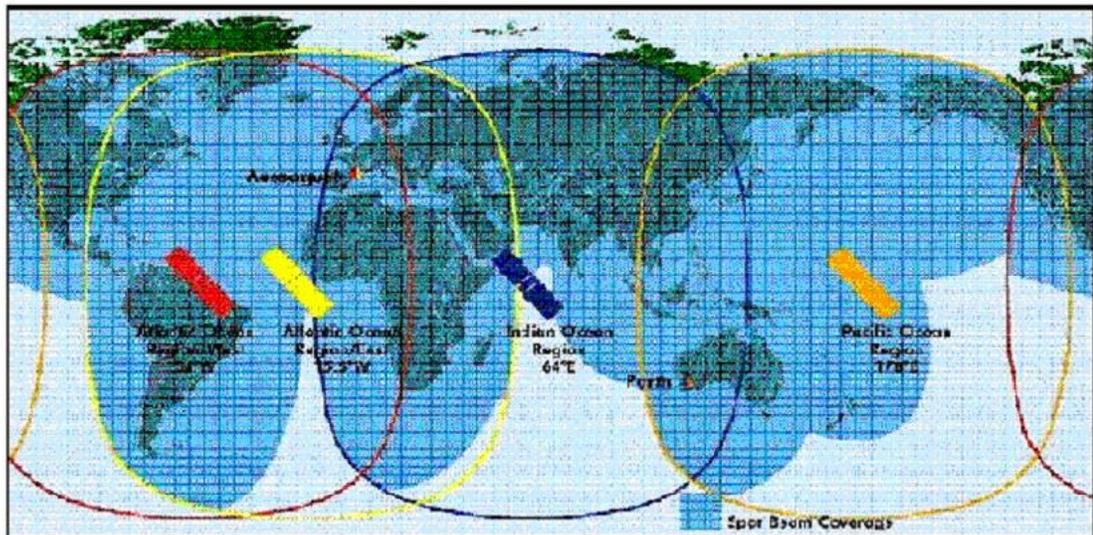
Se puede observar de las figuras 12 y 16, para las radioayudas NDB y las VOR/DME, que las instalaciones por ser estaciones terrestres, tienen mayormente cobertura sobre el área terrestre. Por lo que la parte cubierta sobre el mar es limitada.

La FIR ( *Flight Information Region* ) que es responsabilidad de COCESNA cubre mayormente el istmo centroamericano y en menor grado las

áreas oceánicas. En la Figura 15 se presenta la FIR centroamericana, que prácticamente resume la cobertura de las radioayudas del presente.

Como una observación y comparación, pero sobre otros sistemas, tal como lo es la cobertura para satélites, se puede ver que cuentan con áreas de mucho mayor tamaño, cubriendo continentes enteros y la mayor parte del mundo habitado.

**Figura 16. Coberturas de cuatro satélites a diferentes longitudes**



Fuente: Presentación seminario ATN, Cuba 2002

### **Costo de la inversión inicial**

Otro factor de importancia es el costo de las radioayudas terrestres, que es del orden de US\$500,000 para una estación VOR/DME. Lo que hace que, para poder ejecutar un proyecto de renovación de la totalidad de éstas en nuestra región, tendría un costo del orden de los US\$18,000,000.

El costo de estos equipos es altamente elevado, porque no son equipos o maquinaria que tengan mucha demanda alrededor del mundo. Es decir la producción masiva de ésta tecnología no es aplicable. Se pueden comparar con los automóviles, en nuestro país. Por ejemplo si suponemos que existen diez radioayudas, en Guatemala, pero existen cuatro millones de automóviles, esto implica una gran diferencia en la demanda.

Por lo que por la ley de la oferta y la demanda, al existir muy poca demanda tienen un alto precio. Tal y como se estudia en el curso de ingeniería económica 2, de la facultad de ingeniería en la USAC.

En general el equipo necesario para montar una estación terrestre es costoso para las radioayudas, a excepción para el NDB por ser de menor complejidad.

### **Mantenimiento dificultoso**

Puesto que la inversión inicial para instalar una radioayuda, limita los proyectos de renovación, en nuestros países se intenta prolongar la vida útil de los equipos, a través del mantenimiento preventivo en forma extensa, hasta agotar los lotes de repuestos.

El problema de proporcionar mantenimiento correctivo y preventivo a equipos que sobrepasan la vida útil radica en que: Entre más antigua es la fecha de fabricación de las estaciones, es más difícil de encontrar repuestos en el mercado local y muchas veces aún es difícil encontrarlos en el mercado internacional.

Según experiencias con reparaciones de las estaciones, se ha tenido la dificultad de obtener repuestos equivalentes, pero que al hacerlos funcionar

con las mismas condiciones de los originales, no funcionan. A veces éste tipo de prueba puede llegar a ser destructiva para los equipos, lo que da como resultado una condición final peor que la inicial.

### **Confiabilidad**

La confiabilidad se ve reducida en aquellos lugares donde se encuentran árboles u obstáculos grandes como edificios, para las radioayudas VOR, porque la información de azimut es proporcionada en modulación AM.

En algunos casos aún las estaciones DVOR presentan algún tipo de perturbación en ciertos radiales. Tal es el caso de una radioayuda DVOR, que fue renovada cerca de la localidad de Rabinal. La nueva estación presenta la misma perturbación en un cierto radial que la antigua, es decir el problema está relacionado al sitio en particular.

A continuación se presenta una tabla resumen de las limitaciones de las estaciones terrestres como ayudas a la navegación aérea:

**Tabla I. Resumen de limitaciones de radioayudas terrestres**

<b>Limitaciones</b>	<b>NDB</b>	<b>DME</b>	<b>VOR</b>	<b>ILS</b>
Confiabilidad limitada en ciertos lugares				
Cobertura geográfica limitada				
Navegación directa al destino no factible				
Requiere línea de vista al receptor de abordó				
Terreno impide instalación en algunos lugares				
Equipo terrestre costoso				

**Fuente: [www.Orpac.org](http://www.Orpac.org)**



## **2. SISTEMAS DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN MEDIANTE SATÉLITES**

### **2.1 Sumario**

En este capítulo se intenta describir y/o explicar el funcionamiento de los sistemas de localización por medio de satélites. Sin embargo se hace la salvedad que el sistema GPS de los Estados Unidos de Norteamérica no es el único, pero que mucha de la teoría se ha tomado particularmente de ese sistema por encontrarse información más de este que de los otros sistemas.

Los sistemas de determinación de la posición mediante satélites, utilizan como referencia una constelación de satélites que orbitan alrededor de la tierra (segmento espacial). La constelación de satélites transmite señales que son decodificadas por los receptores en todo el mundo (segmento usuario). El monitoreo y control del segmento espacial se lleva a cabo por medio de estaciones terrestres (segmento de control).

La información de la posición del usuario respecto a la constelación es comparada con un modelo de la tierra, luego el receptor puede calcular su posición sobre el planeta.

El GPS es un sistema de localización mundial, fundado y controlado por el departamento de defensa de los E.U.A. Este cuenta con tres segmentos: Espacial, control y usuario. Por ser su propietario el gobierno de dicho país, la confiabilidad de este sistema se ve limitada, por las decisiones que se tomen

por parte de sus dirigentes. Es decir en caso de que se dé alguna guerra en contra de esta potencia mundial, el GPS puede bajar su exactitud o hasta podría ser apagado.

El GPS fue diseñado para funcionar con dos tipos de servicios: PPS y SPS. El primer servicio fue considerado para ser utilizado por las fuerzas militares, cuenta con la mejor exactitud. El segundo fue hecho con el objetivo de poder ser usado por civiles, éste tiene una menor exactitud que el primero.

El DGPS es una técnica que utiliza un método de corrección de errores, por medio de estaciones de referencia de las que se conoce su posición. Los errores calculados por las estaciones de referencia, luego son enviados por medio de algún canal de comunicación hacia el usuario, para poder obtener un posicionamiento más preciso.

El sistema GLONASS es la contraparte del GPS Norteamericano, consta de los mismos segmentos, sin embargo el segmento espacial tiene algunas variaciones en lo que respecta a la cantidad de planos orbitales y de satélites por plano. Según la tabla I se encontró que el GPS tiende a ser más exacto que el GLONASS.

## **2.2 Reseña histórica**

Muchas de las innovaciones tecnológicas a través de la historia, se han logrado debido a que existe una constante lucha o rivalidad entre las distintas sociedades que han conformado la humanidad, es decir entre los países, por lo cual se desarrollan ventajas tecnológicas en contra de los demás. Dentro de las que podemos mencionar esta la computadora, el radar y el sistema de posicionamiento global.

En el año 1973 el departamento de defensa de los estados unidos realizó una inversión de 12 mil millones de dólares, con el objetivo de iniciar el proyecto Navstar GPS, el cual tendría como propósito proveer información precisa de localización para aeronaves, navíos, submarinos, tanques de guerra, etc.

Hasta el año 1983 el sistema Navstar GPS, empezó a transmitir sus señales para uso civil, por orden del presidente Ronald Reagan, debido al incidente en pleno vuelo del 007 de las aerolíneas coreanas, destruido por parte de un bombardero soviético, después de sobrepasar accidentalmente los límites del espacio aéreo prohibido.

El primero de mayo del 2000, el presidente Bill Clinton firmó el cese inmediato de la limitación intencional de la precisión del sistema GPS, la cual era una ventaja sobre los usuarios militares sobre los civiles. A partir de esa fecha se cuenta con exactitud militar, un error no mayor de 10 metros, diez veces menor a la exactitud anterior de 100 metros.

El GPS fue fundado y es controlado por el departamento de defensa de los Estados unidos. A pesar de que existan una gran cantidad de usuarios civiles alrededor del mundo, fue diseñado y es operado por el ejército de los Estados Unidos de Norteamérica.

### **2.3 Principio de funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite**

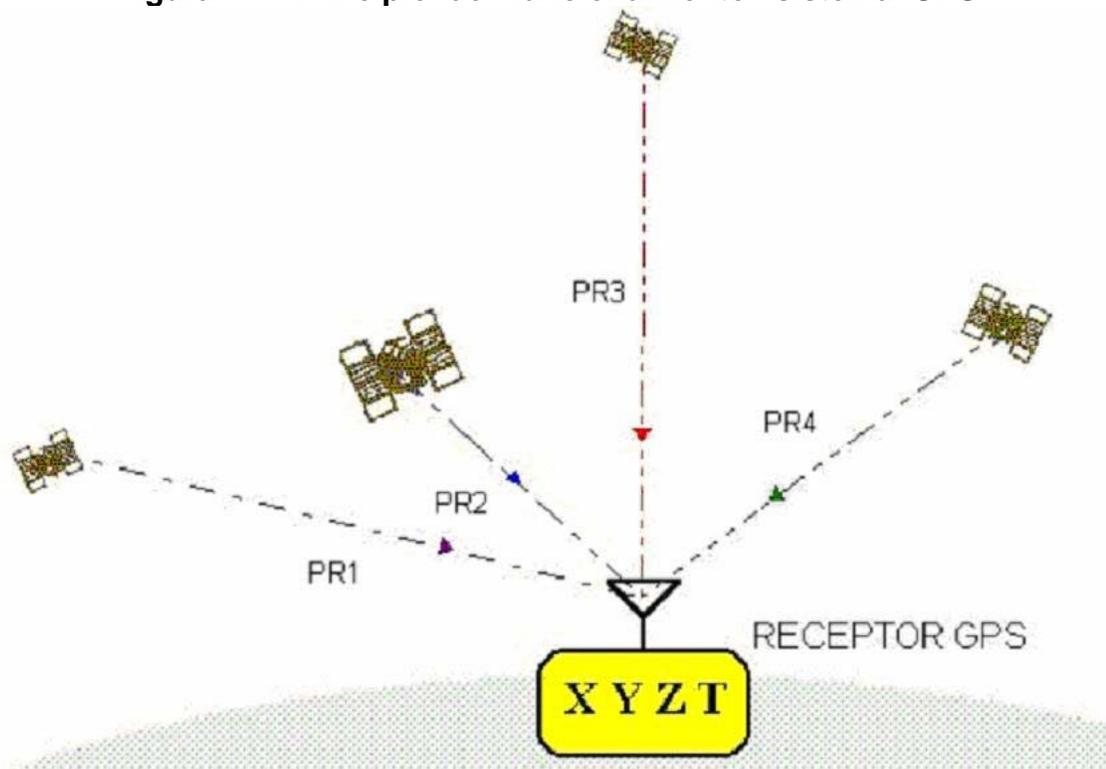
Los sistemas de navegación por satélite, son sistemas en los que sus usuarios utilizan como referencia las señales provenientes de vehículos espaciales (satélites) que orbitan el planeta. Se dice que dichos sistemas están compuestos por tres segmentos:

- Segmento espacial: La constelación de satélites.
- Segmento de control: El cual es el que monitorea y controla todo el sistema.
- Segmento del Usuario: El que consiste de los diferentes tipos de receptores en todo el mundo.

El segmento espacial esta compuesto de una constelación de satélites, los que proveen señales especialmente codificadas que pueden ser procesadas por el segmento de usuario, los receptores. Así es como los receptores pueden interpretar las señales adquiridas habilitándolos para hacer el cálculo de su posición, velocidad y tiempo.

Por lo menos cuatro señales provenientes de satélite son usadas para calcular posiciones en tres dimensiones y el corrimiento de tiempo, para su respectiva corrección en el reloj del receptor.

**Figura 17. Principio de funcionamiento sistema GPS**



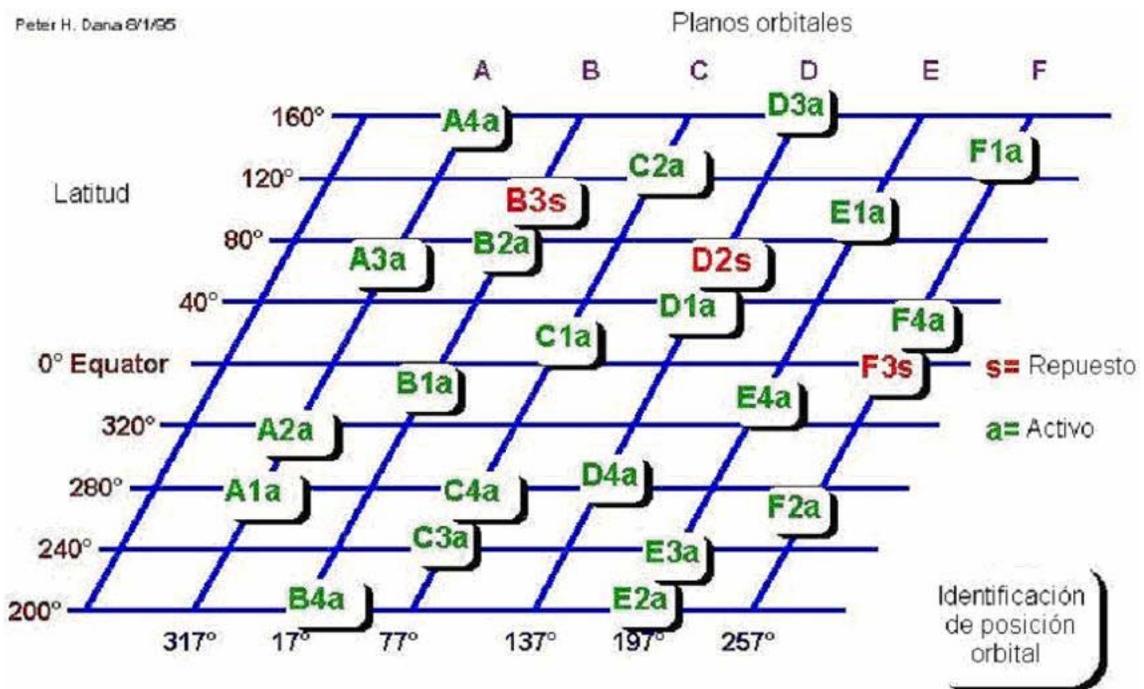
### **2.3.4 Segmento espacial**

En el caso del GPS la constelación está compuesta por 24 satélites, los cuales están orbitando en 6 diferentes trayectorias o planos orbitales, aproximadamente con un período de 12 horas. Regularmente hay más de 24 satélites operacionales, porque nuevos son puestos en órbita, para sustituir los de tiempo de vida útil sobrepasada o los que puedan experimentar alguna clase de mal funcionamiento.

Cada una de las trayectorias o planos orbitales, están compuestos por cuatro satélites. Las trayectorias están igualmente espaciadas sesenta grados entre sí e inclinadas cincuenta y cinco grados respecto del plano ecuatorial.

En la figura 18 se señalan los planos orbitales, nombrados de la A a la F, así como cuales de los satélites están siendo utilizados (A = Activos) y cuales están previstos para ser utilizados posteriormente para reemplazo (S=Repuesto).

**Figura 18. Representación simplificada de una constelación nominal GPS**



Fuente: [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps)

### 2.3.5 Segmento de control

El segmento de control consiste de una red de estaciones terrestres, con las que se puede controlar y retroalimentar al segmento espacial. Dicho control se logra por medio del monitoreo constante, de una serie de estaciones terrestres, estratégicamente ubicadas alrededor del mundo, sobre las señales producidas por el segmento espacial.

Para el sistema GPS existe una estación maestra de control ubicada actualmente en Colorado Springs. En esta estación se reúne la información de las estaciones de monitoreo, con estos datos se calculan las órbitas de los satélites y las correcciones a los relojes.

Las estaciones de monitoreo miden las señales de los satélites, las cuales son utilizadas para alimentar modelos orbitales para cada satélite. Por medio de estos modelos se calculan la información precisa de orbita (ephemeris) y las correcciones de reloj para cada satélite.

La estación maestra de control envía las correcciones de órbita y reloj a los satélites, como retroalimentación. En la figura 19 se presenta la red de estaciones de control y monitorización para el sistema GPS.

**Figura 19. Red de monitorización y control del sistema GPS**



Fuente: [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps)

### 2.3.6 Segmento de usuarios

El segmento de usuarios esta compuesto de los aparatos receptores como de la comunidad usuaria del sistema. Los receptores convierten las señales provenientes de los satélites en estimaciones de posición, velocidad y tiempo. Cuatro satélites son necesarios para el cálculo de cuatro dimensiones: X, Y, Z (posición) y tiempo.

Los receptores son utilizados para navegación, posicionamiento, diseminación del tiempo, y otra clase de investigaciones.

- La navegación en tres dimensiones es la función primordial del sistema. Los receptores para navegación son hechos para aeronaves, naves marítimas, vehículos terrestres y para personas individuales (receptores portátiles).
- El posicionamiento preciso es posible usando los receptores en lugares de referencia lo que provee correcciones y posicionamiento relativo. Algunos ejemplos que se pueden citar son los estudios de campo, control geodésico (ver geodesia en el glosario) y estudio de las placas tectónicas.
- La diseminación del tiempo y la frecuencia, basándose en los relojes de alta precisión a bordo de los satélites y controlados por las estaciones de monitorización, es otro uso para los sistemas de posicionamiento global. Observatorios astronómicos, estaciones de telecomunicaciones y redes de radares, pueden ser ajustados a señales de reloj de alta precisión por medio de receptores de propósito especial.
- Proyectos de investigación han usado señales GPS para medir parámetros atmosféricos.

## 2.4 El sistema GPS

Como anteriormente se mencionó el sistema GPS fue fundado y es controlado por el departamento de defensa de los Estados Unidos. Mientras que existen grandes cantidades de usuarios alrededor del mundo, el sistema fue diseñado y es operado por el ejército norteamericano. En otras palabras este sistema puede ser apagado a discreción de su propietario, el gobierno de los EUA.

Según la organización clásica de los sistemas satelitales, esta compuesto por tres segmentos:

- Segmento de control: Con equipo de base terrestre para supervisar los satélites y actualizar la información que transmiten. Este realiza tres funciones principales (seguimiento, predicción y carga de datos) y cuenta con una estación maestra de control y cinco monitoras como fue mostrado en la Figura 19.
- Segmento espacial: Proporciona cobertura mundial con un número de cuatro a ocho satélites simultáneamente observables por encima de un ángulo de elevación de 15 grados, que se logra estableciendo satélites en 6 órbitas casi circulares a una altitud de 20200 Km.
- Segmento de usuario: Compuesto por un número ilimitado de receptores que reciben las señales del segmento anterior y calculan la posición instantánea y otros datos para la navegación.

### **2.4.1 Principio de funcionamiento**

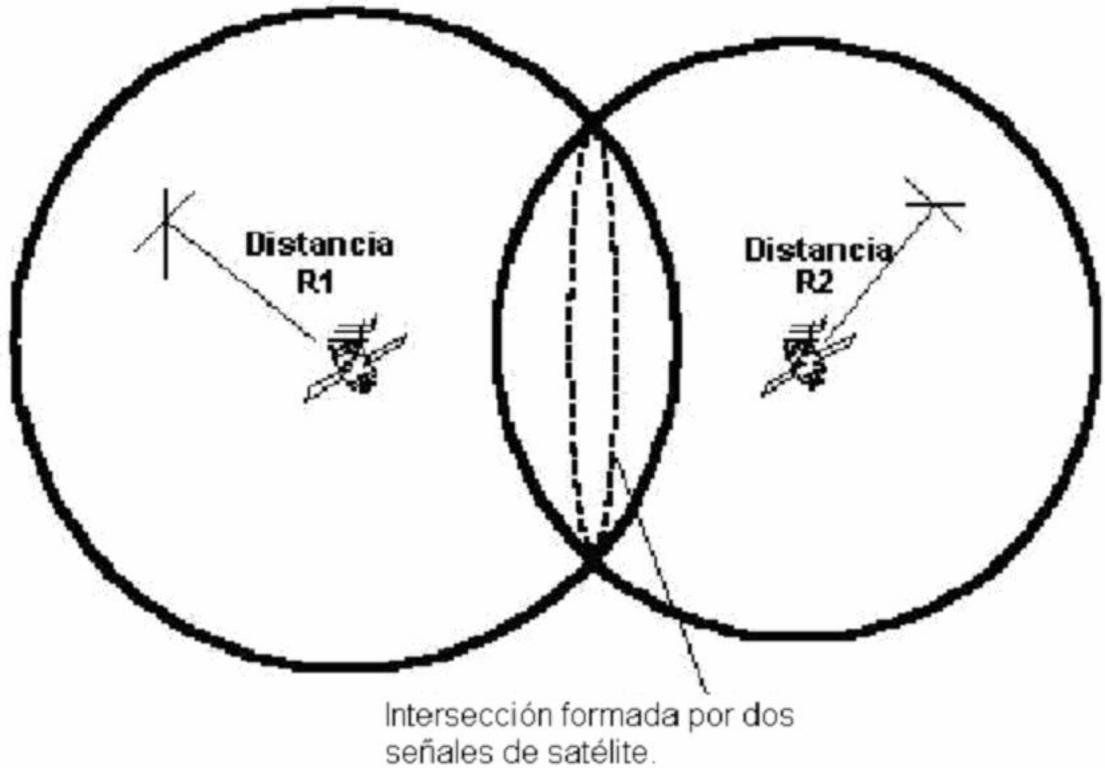
El sistema GPS emplea una tecnología compleja y avanzada, sin embargo el principio básico de determinación de la posición esta basado en la medición de distancias a los satélites y el conocimiento de la posición de cada satélite en todo momento.

Todos los satélites en el sistema emiten constantemente señales de navegación y temporización, pero compartiendo la mismas frecuencias sin interferirse unos a otros. Cada satélite posee su propio código de identificación distintivo.

Si se utiliza la señal de un solo satélite, este transmitiría la información de posición del mismo y la necesaria para que un receptor pudiera calcular la distancia del receptor al satélite. Así que la posición del receptor estaría en alguna parte de la superficie de una esfera centrada en la posición del satélite.

Ahora bien si se emplean las señales transmitidas por dos satélites estos proporcionarían al receptor la información necesaria para ubicar la posición del receptor en alguna parte de la intersección de las dos esferas generadas por los satélites, así como se muestra en la figura 20.

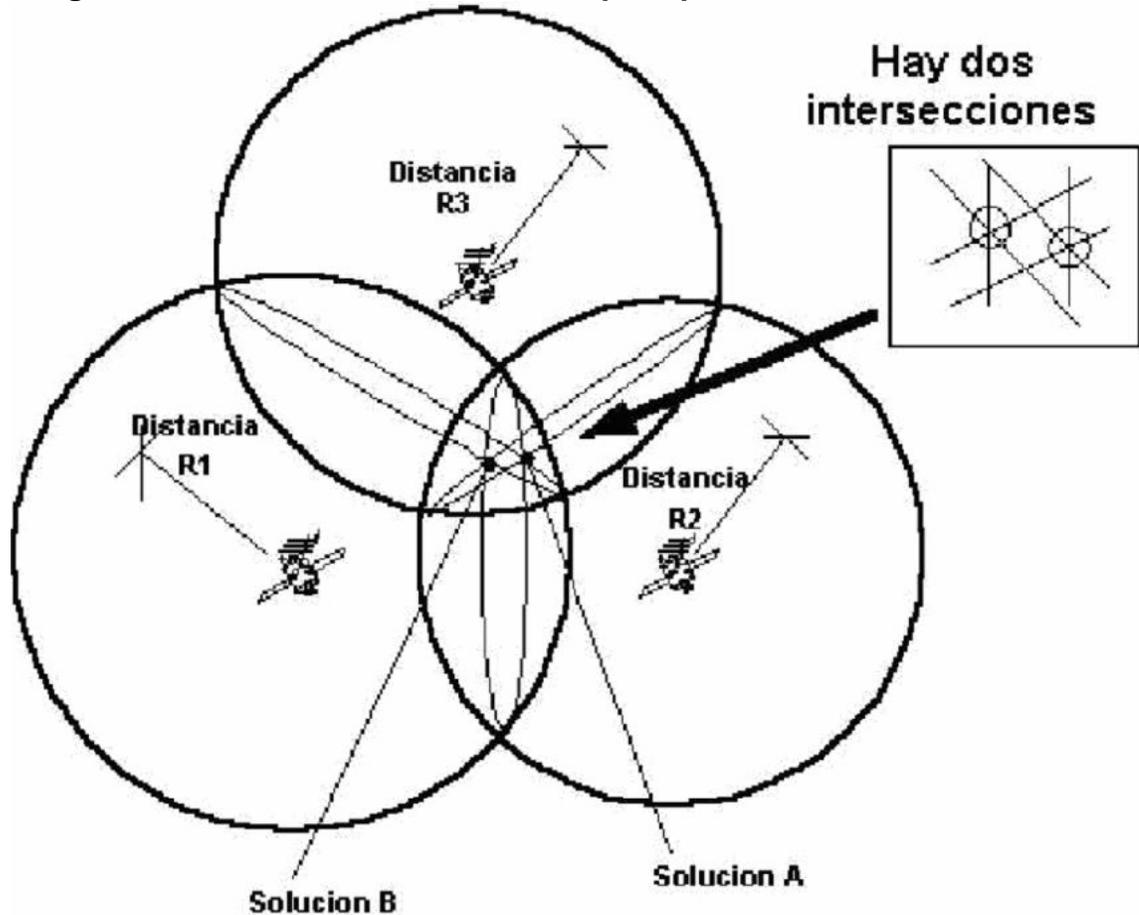
Figura 20. Ubicación de un receptor por dos satélites GPS



Por medio del uso de una tercera medición de distancia, a un tercer satélite, se pueden obtener dos posiciones que corresponden a las intersecciones de las tres esferas centradas en cada satélite y con radios iguales a las distancias hacia el receptor, como se muestra en la figura 21.

Una de las dos soluciones del receptor es descartada automáticamente por la computadora del receptor, al ser comparada con el modelo de la esfera formada por la superficie de la tierra, quedando una solución correcta.

Figura 21. Localización de un receptor por medio de tres satélites



Para que este sistema funcione correctamente, las mediciones de tiempo deben ser muy precisas y los relojes deben ser muy exactos. Dentro de los satélites, se logra esta exactitud por medio de los relojes atómicos que tienen precisiones medidas en nanosegundos.

El uso de un reloj atómico en un receptor, no se puede llevar a la práctica sino que sería muy costoso, por lo que los receptores emplean un modelo para obtener una hora precisa del sistema de satélites y determinar la posición exacta del receptor sobre la superficie de la tierra.

Debido a que los satélites transmiten su información de posición con relación al centro de la tierra y las señales de temporización. Entonces el receptor interpreta esta información y la combina con su propio modelo interno de la tierra, para calcular una posición con relación a la superficie de la misma, que entonces puede mostrarse en términos de latitud, longitud y altura.

#### **2.4.2 Tipos de servicios**

Dentro del diseño del sistema fueron contemplados dos tipos de servicios, según las especificaciones del plan federal de radionavegación de los EUA, uno de alta y otro de baja exactitud, con la idea de brindar un servicio con una ventaja superior a los usuarios militares sobre los civiles.

El de alta es denominado PPS, de sus siglas en inglés de *Precise Positioning Service*, o bien servicio de posicionamiento preciso.

El de baja exactitud es conocido como SPS, de sus siglas en inglés de *Standard Positioning Service*, lo que corresponde a servicio de posicionamiento estándar.

#### **2.4.3 Servicio de Precisión (PPS)**

Solamente usuarios autorizados con equipo criptográfico, con las claves adecuadas, pueden tener acceso al servicio de precisión. Estos usuarios autorizados son: El ejército norteamericano, sus aliados, ciertas agencias gubernamentales y usuarios civiles seleccionados aprobados por el gobierno de los Estados Unidos.

La exactitud y precisión del servicio es:

- 22 metros de horizontal
- 27.7 metros de vertical
- 200 nanosegundos de tiempo de hora universal (UTC)

#### **2.4.4 Servicio Estándar (SPS)**

Los usuarios civiles alrededor del mundo pueden utilizar el SPS, sin ningún costo o restricción. La mayoría de receptores son capaces de recibir y utilizar la señal SPS. La exactitud de este servicio es intencionalmente degradada por el departamento de defensa de los Estados Unidos, por medio del uso de la disponibilidad selectiva.

La exactitud y precisión del servicio es:

- 100 metros horizontal
- 156 metros vertical
- 340 nanosegundos de tiempo de hora universal (UTC)

### **2.5 Señales y datos GPS**

La radiodifusión actual de portadora por parte de satélite es una señal de espectro ampliado que la hace menos susceptible a perturbaciones intencionales (o no intencionales), esto se hace para garantizar la calidad de la información transmitida, evitando interferencias.

El elemento clave de la precisión/exactitud del sistema es que todos los componentes de la señal están basados en relojes atómicos. Los relojes del bloque II tienen a bordo cuatro bases de tiempo o frecuencia (dos relojes de rubidio y dos de Cesio). Estas bases de tiempo o frecuencia son el corazón de

los satélites GPS produciendo la frecuencia fundamental en la banda L (10.23 MHz).

A partir de la frecuencia fundamental se derivan dos señales, las portadoras L1 y L2 que se generan multiplicando la frecuencia fundamental por 154 y 120:

- L1 = 1 575.42 MHz (Longitud de onda = 19 cm)
- L2 = 1 227.60 MHz (Longitud de onda = 24 cm)

El uso de las frecuencias duales es esencial para eliminar la fuente principal de errores, es decir la refracción ionosférica (ver glosario refracción).

Las pseudodistancias que se obtienen a partir del tiempo de viaje medido de la señal desde cada satélite al receptor, emplean dos códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN) que están modulados sobre las portadoras (L1 y L2).

El primer código es el código C/A (código de adquisición imprecisa), designado también como servicio estándar de determinación de la posición (SPS) del que se dispone para usos civiles, cuando existe restricción por parte del gobierno de Estados Unidos. Este código está modulado solamente sobre L1 y se omite de L2.

El segundo es el código P (código de precisión), también designado como servicio de determinación de la posición (PPS) que fue diseñado para uso militar de los EUA y para otros usuarios autorizados. Este código está modulado sobre ambas portadoras L1 y L2.

Ilustrado en forma de diagrama a bloques, aparece en la Figura 22 la forma en que las señales GPS son generadas dentro del satélite. Debido a la multiplicación de la frecuencia fundamental en la banda L, se generan las portadoras de microonda L1 y L2.

La portadora L1 lleva el mensaje de navegación y las señales del código SPS. La portadora L2 es usada para medir el retardo ionosférico por los receptores equipados con el servicio PPS.

Existen tres códigos binarios que modulan las portadoras L1 y/o L2:

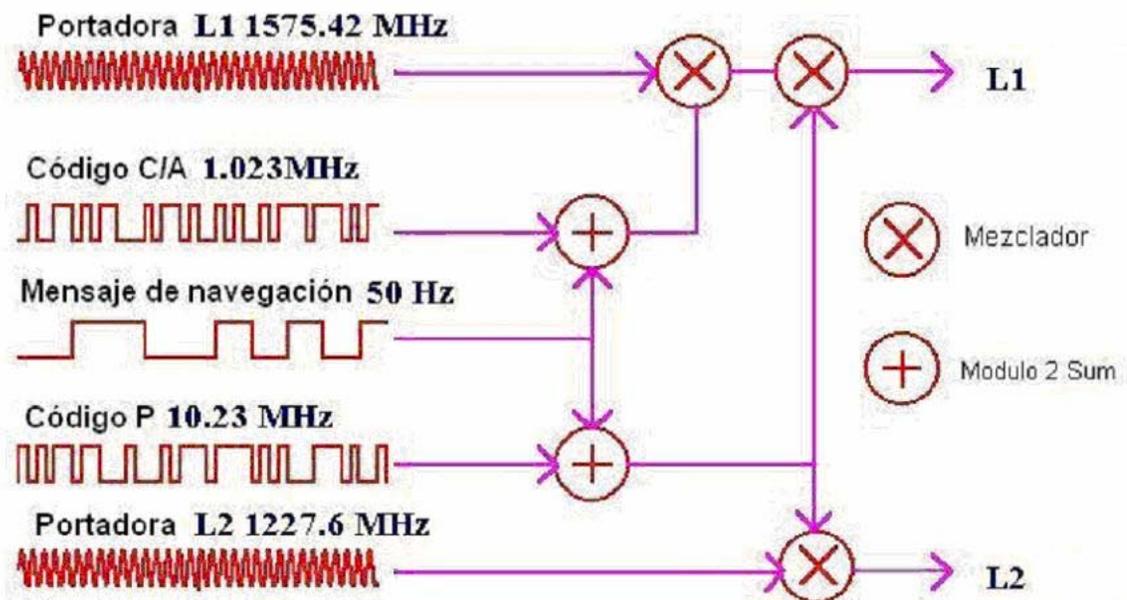
- El código C/A modula la portadora L1 (este código es de ruido pseudoaleatorio repetitivo de 1MHz) barriendo su espectro o ampliándolo sobre un ancho de banda de 1MHz. La repetición de este código es cada 1023 bits (un milisegundo). Hay un código C/A de ruido pseudoaleatorio para cada satélite. Los satélites GPS son regularmente identificados por su número de PRN(ruido pseudoaleatorio).
- El código P (preciso) modula ambas portadoras L1 y L2. Este código es muy largo (siete días) y es repetitivo de ruido pseudoaleatorio de 10MHz. En el modo de antisimulación (explicado también en los últimos dos párrafos del 2.5), el código P es encriptado en el código Y. El código Y encriptado requiere un módulo o tarjeta especial (A-S) para cada canal del receptor y es para uso exclusivo de usuarios autorizados con las claves criptográficas. El código P(Y) es la base para el PPS.
- El mensaje de navegación también modula la L1- señal de código C/A. El mensaje de navegación es una señal de 50Hz que

consiste de bits de datos que describen las órbitas de los satélites GPS, correcciones de reloj y otros parámetros del sistema.

En otras palabras la información transmitida por los satélites GPS, además de los PRN, esta compuesta de la siguiente información adicional:

- Las efemérides de satélites.
- Los coeficientes de modelación ionosférica.
- La información de condición de salud.
- La hora del sistema y los errores sistemáticos del reloj.

**Figura 22. Señales transmitidas por satélites GPS**

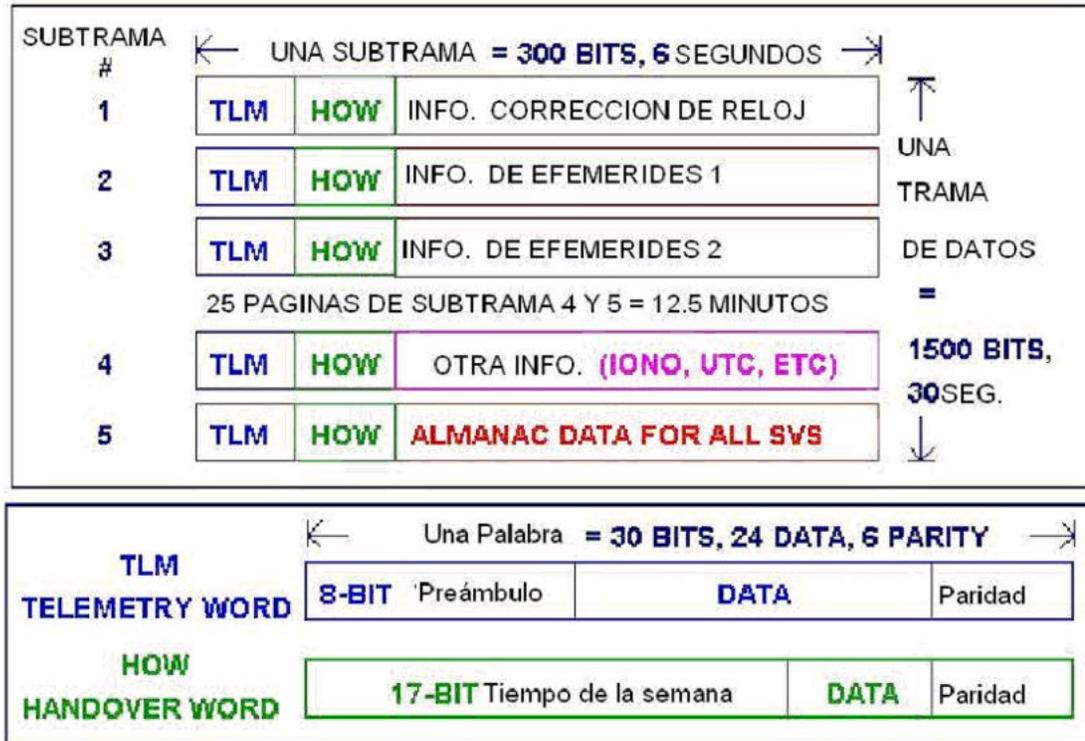


Fuente: [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps)

Con respecto a la información o datos transmitidos por los satélites GPS se tiene:

- El mensaje de navegación GPS consiste de un flujo de bits con identificación de tiempo, que marcan el tiempo de transmisión de cada subtrama en el tiempo que son transmitidos por el satélite. Una trama de datos consiste de 1500 bits divididos en cinco subtramas de 300 bits. Una trama de datos es transmitida cada 30 segundos. Tres subtramas de 30 segundos contienen información orbital y de reloj. Las correcciones de reloj del satélite son enviadas en la primera subtrama, la información precisa de parámetros de efemérides del satélite transmisor son enviados en la subtrama dos y tres. Las subtramas cuatro y cinco son usadas para transmitir diferentes páginas de información del sistema. Veinticinco tramas (125 subtramas) hacen el mensaje completo de navegación que es mandado en un período de 12.5 minutos.
- Las tramas de datos (1500 bits) son enviados cada 30 segundos. Cada trama consiste de 5 subtramas.
- Las subtramas de datos (300 bits transmitidos durante seis segundos) contienen bits de paridad que permiten el chequeo de datos y corrección de errores.

**Figura 23. Formato de datos de navegación GPS**



Fuente: [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps)

En la figura 24 se muestra la medición de la seudodistancia. En principio el receptor compara el código transmitido por el satélite con una réplica del mismo generada internamente. De dicha comparación se obtiene un desplazamiento del tiempo, denominado también como seudodistancia. Multiplicando éste último dato por la velocidad de la luz  $c$ , se obtiene la distancia del usuario al satélite.

Para la determinación de la posición absoluta GPS en tres dimensiones es necesario efectuar mediciones de cuatro seudodistancias de distintos satélites, según Fig. 17.

La medición extra es para determinar el desplazamiento de reloj entre el reloj de cesium muy preciso del satélite y el reloj de cuarzo impreciso del receptor. Por lo que debe resolverse el siguiente sistema de ecuaciones con cuatro parámetros desconocidos:

Sistema de ecuaciones para determinar la posición absoluta GPS:

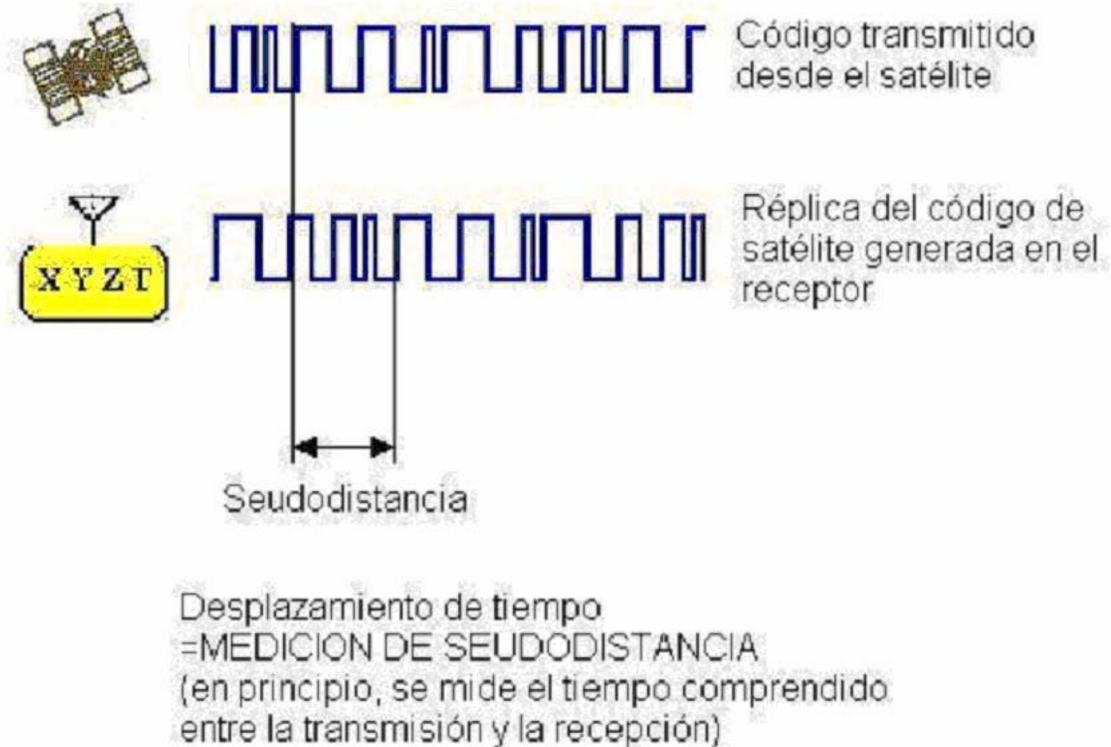
$$\begin{aligned}\sqrt{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2 + (z_1-z)^2} + cdT &= PR1 \\ \sqrt{(x_2-x)^2 + (y_2-y)^2 + (z_2-z)^2} + cdT &= PR2 \\ \sqrt{(x_3-x)^2 + (y_3-y)^2 + (z_3-z)^2} + cdT &= PR3 \\ \sqrt{(x_4-x)^2 + (y_4-y)^2 + (z_4-z)^2} + cdT &= PR4\end{aligned}$$

Otra información adicional acerca de la administración y diseño del GPS, es lo que se refiere a las técnicas de garantía del sistema. Para esto existen dos métodos para denegar a los usuarios civiles el uso pleno del sistema GPS, la disponibilidad selectiva y el proceso epsilon.

La disponibilidad selectiva es una clase de denegación mediante la vacilación de la frecuencia del reloj del satélite de forma que se impide que los usuarios civiles midan con precisión las pseudodistancias instantáneas.

El segundo método, el proceso epsilon, consiste en truncar el mensaje de navegación transmitido de forma que no puedan calcularse con precisión las coordenadas de los satélites.

**Figura 24. Medición de la pseudodistancia**



Fuente: Manual del sistema geodésico mundial - 1984 (WGS-84)

Una última característica incluida en el diseño del GPS es la antisimulación o *Anti-Spoofing* (A-S), que es la capacidad de eliminar esencialmente el código P o de invocar un código criptografiado (código Y), como medio para denegar el acceso al código P a todos los usuarios excepto los autorizados.

Entonces en el caso que la antisimulación (A-S) entre a operar el acceso al código P solamente es posible instalando en cada canal de receptor una tarjeta especial que solo se puede adquirir en base a una autorización.

## 2.6 Precisión

La precisión de la posición calculada, es afectada debido a varios errores que se dan en el sistema. Estos errores en conjunto pueden estar en un rango de 10 a 25 metros, dependiendo del tipo de receptor, la posición relativa del satélite y la magnitud de otros errores.

Los errores más comunes son los siguientes:

- **Error ionosférico:** Es el más significativo y se ocasiona durante el paso de la señal del satélite a través de la ionosfera de la tierra (entre 130 y 190Km sobre la superficie). Al desplazarse las señales de radiofrecuencia a través de dicha capa, se hacen más lentas dependiendo de la hora del día, la actividad solar y otros factores.
- **Error atmosférico:** Se introduce este error cuando la señal atraviesa la atmósfera. El vapor de agua, en esta capa, hace más lenta la velocidad de propagación y reduce adicionalmente la exactitud del sistema.
- **Disponibilidad selectiva:** Desde el inicio de la puesta en marcha del sistema GPS, por política del gobierno propietario, se introdujo intencionalmente un error, llamado disponibilidad selectiva (SA), con el objeto de negar a los usuarios la exactitud del sistema en situaciones bélicas (error de 100mts). Sin embargo a partir del 1 de mayo del 2000, los E.U.A decidieron retirar la SA, por lo que el error de la posición ahora esta en el rango de 10 a 25 metros, para cualquier usuario. Pero con la capacidad de activarla en una determinada región del mundo, en caso de ser necesario.

- Error del receptor: El receptor puede introducir errores durante su procesamiento. Pueden ser causados por ruido térmico, precisión del software, etc.
- Dilución de precisión (DOP) por posición: La posición de los satélites que se están utilizando para determinar la ubicación del receptor, influyen grandemente en la exactitud de los cálculos.
- Error de multitrayectoria: Este ocurre cuando la señal no es solo recibida directamente desde el satélite sino desde las superficies cercanas a la antena del receptor por la reflexión de la señal. La señal por reflexión y la directa se superponen, produciendo errores de fase, los cuales traen como consecuencia medidas erradas de las distancias a los satélites.

## **2.7 GPS diferencial**

La idea detrás de todo posicionamiento diferencial es la de corregir errores de medición de pseudodistancia, en una posición con los errores de pseudodistancia medidos y en un punto conocido. Un receptor de referencia, o una estación terrena, calcula las correcciones para cada satélite.

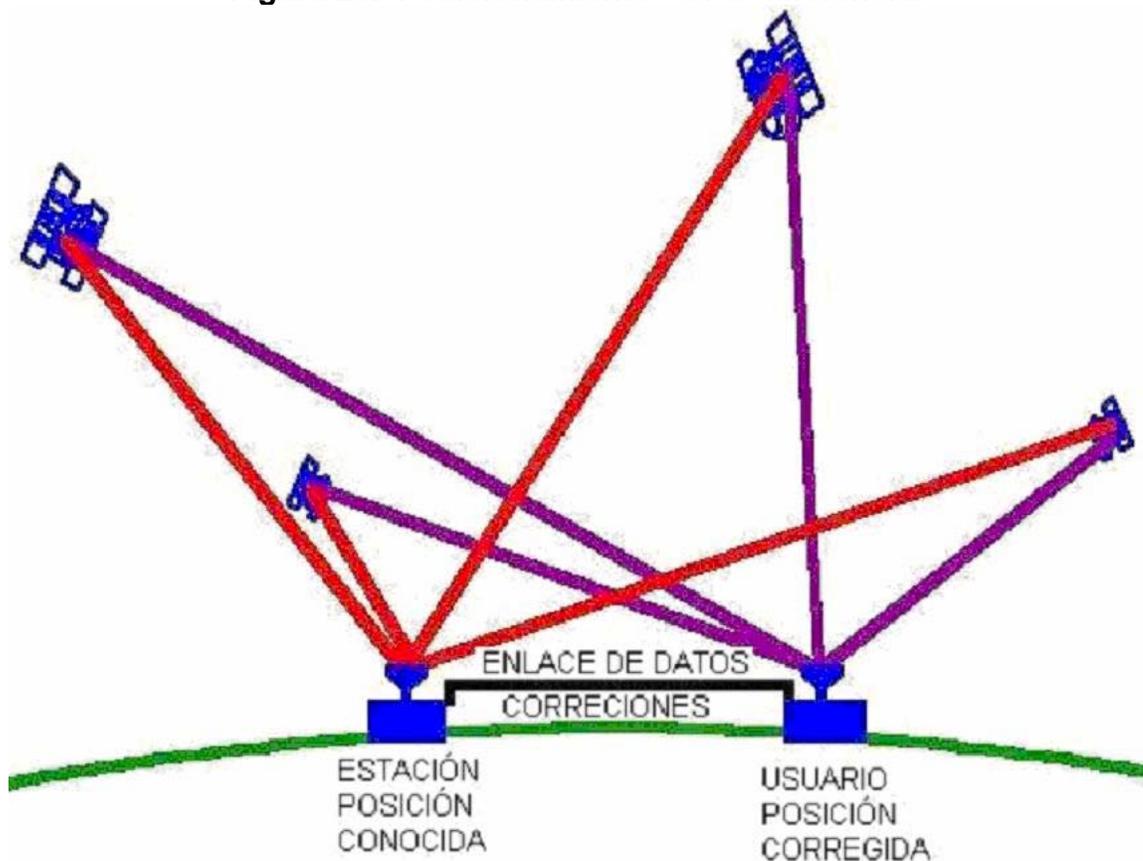
Es decir en otras palabras el GPS diferencial, es una técnica de refinamiento que se auxilia de estaciones terrestres de referencia, incrementando en gran medida la precisión de los receptores GPS.

La utilización de sistemas de navegación diferencial se basa en el hecho de que una buena parte de los errores de los sistemas de navegación están fuertemente relacionados entre receptores adecuadamente próximos. En adición gran parte de estos errores también varían de forma suficientemente lenta con el tiempo, por lo que pueden ser corregidos.

La técnica implica entonces que un receptor cuya posición es conocida puede estimar los errores del sistema y transmitirlos de alguna manera a los usuarios para que estos corrijan sus respectivas lecturas.

En la Figura 25 se muestra que sí existe una estación con una posición conocida, esta puede estimar su posición de acuerdo a las señales de los satélites GPS. Además puede comparar su posición conocida y la posición estimada por los satélites, luego así calcular el error diferencial entre la posición real y la estimada, para después transmitir al usuario la información de posición corregida por medio de un enlace de datos.

**Figura 25. Posicionamiento GPS diferencial**



Se han hecho varias propuestas para transmitir las correcciones DGPS. Algunas de dichas propuestas son:

- El uso de radiofaros marítimos en la banda de frecuencias medias.
- El uso de *Pseudolites*, que son estaciones de referencia especiales que transmiten una señal idéntica a la de los satélites GPS y, por tanto, se puede utilizar el mismo receptor, pero se tiene el principal inconveniente que presentan las características de propagación de la banda L utilizada ( limitaciones en la cobertura).
- DGPS de área extensa y GPS expandido.

Los radiofaros marítimos se utilizan para la navegación marina, los que conforman una red mundial de estaciones en la banda de frecuencias medias (MF), de 285 y 315KHz.

Una red DGPS utilizando como soporte o medio de transmisión los radiofaros resulta viable para la navegación marítima por varias razones. Por ejemplo los radiofaros están ampliamente difundidos y se puede contar con una red ya dispuesta por un bajo costo. La guarda costera de los E.U.A está interesada en utilizar esta red para la navegación en bahías y zonas costeras. Además la propagación por onda de superficie en estas frecuencias proporciona cobertura más allá de la línea del horizonte. Por último, los equipos son fáciles de diseñar y fabricar debido al uso de esta banda de frecuencias.

Los *pseudolites* son equipos de telecomunicaciones compatibles con los transpondedores de los satélites GPS y que están situados sobre el suelo en aquellas áreas donde puede resultar conveniente. Transmiten una señal muy parecida a la de GPS para usos civiles y los instantes de transmisión están controlados a través de la norma de transmisión temporal de los satélites GPS.

De hecho los *pseudolites* pueden proporcionar el servicio GPS diferencial más barato, pues la señal es procesada por el mismo hardware que tiene un receptor GPS. De la misma manera que los radiofaros comentados anteriormente, la señal del *pseudolite* transporta las correcciones diferenciales. Sin embargo, a diferencia de los radiofaros, la señal está en la banda L y por tanto la propagación está limitada al horizonte.

Otra característica fundamental del uso de los *pseudolites* es que la señal que transmiten permite que un receptor GPS ligeramente modificado calcule también la pseudodistancia al *pseudolite*.

Esta combinación de cualidades hace de la propuesta por *pseudolites*, muy apropiada para aplicaciones de aterrizaje de aeronaves, sobre todo teniendo en cuenta que se encontrarán en el aire, con más probabilidad en la zona de cobertura del *pseudolite*.

La tercera propuesta presentada es la del GPS de área extensa (*Wide Area DGPS*, *WADGPS*) que se puede considerar un subconjunto del concepto GPS Expandido (*Augmented GPS*, *AUGPS*).

El *WADGPS* (*DGPS* de área extensa) es una mejora sobre el *DGPS* tradicional, para tratar de eliminar la dependencia del error del usuario con respecto a la distancia a la estación de referencia. Para ello, es necesario contar con una red de estaciones monitoras con capacidad de medir el retardo ionosférico por medio de las técnicas de las dos frecuencias y las pseudodistancias a todos los satélites a la vista.

En los E.U.A. se han propuesto 15 estaciones monitoras para cubrir toda la superficie continental. Todas las medidas de estas estaciones son

transmitidas a un ordenador central situado en una estación maestra. Este ordenador es capaz de calcular las posiciones de los satélites, el estado de sus relojes y un modelo atmosférico a partir de estas medidas.

La estación maestra retransmite las correcciones para cada uno de los satélites normalmente a través de uno o varios satélites en órbita geoestacionaria.

El mayor inconveniente de este sistema está en todo el procesamiento que debe efectuar el receptor para recuperar y utilizar estos datos, además de ser capaz de recibir una señal proveniente de un satélite geoestacionario (típicamente de la banda C).

Las pruebas realizadas hasta la fecha del sistema ofrecen resultados que indican un error para el WADGPS de 2-3m, equivalente a un espaciado entre estaciones DGPS de aproximadamente 200 Km.

El GPS extendido (AUGPS) considera que para alcanzar los requisitos de precisión, integridad y fiabilidad del sistema GPS en aplicaciones críticas como aterrizaje instrumental es necesario contar con todas las mejoras posibles del sistema. En este sentido, el GPS expandido comprende el uso de pseudolites, estaciones monitoras del sistema, estaciones maestras para WADGPS, satélites geoestacionarios para la retransmisión de correcciones diferenciales y cualquier otro método que ayuda a mejorar la fiabilidad y precisión.

## 2.8 El sistema GLONASS

El sistema GLONASS (del ruso *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) es un sistema de navegación global por satélite que es la contraparte del sistema GPS de los estados unidos. Es operado por el gobierno Ruso, específicamente por las fuerzas espaciales Rusas.

La federación Rusa implantó el sistema GLONASS para ofrecer señales desde el espacio, en la banda L, a la frecuencia 1602MHz, para la determinación precisa de posición, velocidad y tiempo, con una cobertura continua alrededor del globo terrestre y bajo cualquier condición meteorológica.

Los tres primeros satélites fueron puestos en orbita en Octubre de 1982. Los primeros satélites operacionales entraron en servicio en Diciembre de 1983. Se planeó que el sistema estaría en operación en 1991, pero fue anunciado operacional hasta el 24 de Septiembre de 1993.

Las partes o segmentos del sistema GLONASS son similares al del GPS, sin embargo presentan algunas diferencias como sigue:

- Segmento de espacio: Está constituido por 24 satélites (21 operativos y 3 de repuesto) colocados en tres planos orbitales con una inclinación de 64.8 grados con relación al ecuador terrestre, y con 8 satélites en cada plano orbital a una altitud de 10,313 millas náuticas. El período orbital de cada uno de estos satélites es de 11 horas y 16 minutos.
- Segmento de control: Incluye una estación maestra de control, estaciones de seguimiento de los satélites y las estaciones para enviar mensajes de navegación y control.

- Segmento del usuario: Consiste de los receptores GLONASS, los mismos que están compuestos de un receptor-procesador y su correspondiente sistema de antena.

Este sistema también cuenta con dos tipos de servicio, uno de baja y otro de alta exactitud/precisión, para usuarios civiles y militares.

El Glonass-M será el sucesor del actual Glonass. Este programa modernizará ambos segmentos tanto espacial como terrestre y esta siendo desarrollado.

Las mejoras de este sistema radicarán en:

- Incrementar la vida de servicio de cada satélite: 5 años (versus 3 años en el presente).
- Reducir el tiempo requerido para reemplazar los satélites fallados, incluyendo 6 satélites de reserva en órbita (2 por plano orbital).
- Mejorar la estabilidad de los relojes a bordo.
- Poder estimar los efectos ionosféricos en la señal.

A continuación se muestra una tabla que compara los sistemas GPS y GLONASS.

**Tabla II. GPS frente a GLONASS**

<b>CONSTELACIÓN</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Número de Satélites	24	24
Número de Planos Orbitales	6	3
Inclinación de la órbita (en grados)	55°	65.8°
Radio de la órbita (en Km.)	26560	25510
Periodo (hh:mm)	11:58	11:16
Retransmisión del seguimiento	Día sideral	8 días siderales
Separación de los planos orbitales	60°	120°
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>
Señal portadora (Mhz)	L1 : 1575.42 L2 : 1227.60	L1 : 1602+0.5625n L2 : 1246+0.4375n
Código	CDMA Código C/A en L1 Código P en L1 y L2	FDMA Código C/A en L1 Código P en L1 y L2
Frecuencia del código (Mhz)	Código C/A : 1.023 Código P : 10.23	Código C/A : 0.511 Código P : 5.11

**Continuación de Tabla II. GPS frente a GLONASS**

NORMAS DE REFERENCIA	GPS	GLONASS
Sistema de coordenadas	WGS84	PZ90
Tiempo	UTC (USNO)	UTC (US)
ESPECIFICACIÓN DE PRECISIÓN (95%)	GPS	GLONASS
Horizontal (mts)	10-25 mts	50-70
Vertical	140	150



### 3. SISTEMAS DE AUMENTACIÓN DE LA SEÑAL GPS

#### 3.1 Sumario

La navegación aérea actual descansa en el seguimiento terrestre de las aeronaves en vuelo (vigilancia). Es decir la infraestructura de radares en tierra que las localizan y transmiten su posición a las estaciones terrestres, que son los centros de control de la administración de espacio aéreo correspondiente.

Por otra parte, las aeronaves también disponen de dispositivos de navegación, que les permiten saber su posición (coordenadas) mediante los sensores abordo que consultan a las ayudas de navegación terrestres (las que fueron descritas en el primer capítulo de este trabajo).

Como se recordará, el sistema actual de navegación, en conjunto presenta varias desventajas que fueron mencionadas anteriormente (en el punto 1.6), como lo son la necesidad de requerir una infraestructura amplia de estaciones terrestres que apoyen a la aeronave y la falta de cobertura cuando se sobrevuela un océano.

Entre dichas desventajas se incluyen la saturación del espacio aéreo internacional; y la necesidad de hacer rutas directas, para optimizar costos de operación (tómese como referencia el punto 1.4.4 y la Figura 10). En suma éstas desventajas producen la necesidad de un nuevo sistema, que mejore los beneficios prestados a la navegación aérea basada en radioayudas terrestres. Este nuevo sistema fue nombrado GNSS (de sus siglas en inglés de *Global Navigation Satellite System*).

El sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) propone la utilización de satélites como soporte a la navegación aérea y ofrece localización precisa de aeronaves sobre todo el globo terrestre. Este estaría compuesto de una o más constelaciones de satélites, receptores de aeronaves y un sistema de monitorización íntegro, con aumentación como se requiera para la navegación aérea.

Un sistema de navegación basado en señales proporcionadas por satélites, podrá proporcionar a todos sus usuarios información de posición y tiempo, con gran exactitud, a cualquier hora, en cualquier parte del mundo, no importando las condiciones climatológicas bajo las que funcione.

El GNSS es un término general que comprende a todos los sistemas de navegación por satélite, los que ya han sido desarrollados como núcleo (GPS y GLONASS) y los que están siendo desarrollados para el futuro cercano, para funcionar para apoyo a la navegación aérea.

Los requerimientos que la aviación civil exige a los sistemas de navegación de la actualidad están definidos según OACI como: La exactitud, disponibilidad, integridad y la continuidad. Dependiendo de como un sistema de navegación cumpla con dichos requerimientos puede ser categorizado como: Medio único, medio primario y medio suplementario. Los siete conceptos que se mencionaron anteriormente aparecen en el glosario.

Debido a que los sistemas de navegación actuales como GPS y GLONASS, no cumplen con los requerimientos que la navegación aérea exige en todas las fases de vuelo, es por ello que se introducen los sistemas de aumentación. Para ejemplo se presenta la siguiente tabla:

**Tabla III. Comparación de requisitos GPS frente a Aviación Civil  
Cat.1**

GPS solamente	Requerimientos	Aviación Civil Cat. 1
H. 13m V. 22m	Exactitud (95%)	H 16.0 m V 4.0 m
99%	Disponibilidad	99% a 99.990%
?	Integridad	$2 \times 10^{-7}$ /Aproximación 6s tiempo de alarma
?	Continuidad	$10^{-5}$ /Aproximación ( $10^{-6}$ /15s)

Fuente: Presentación EGNOS TUTORIAL de *Research group of Astronomy and Geomatics Universitat Politecnica de Catalunya*.

#### EN SINTESIS

El GPS y el GLONASS tienen la capacidad de proveer una posición exacta e información de tiempo alrededor del mundo. La exactitud provista por ambos sistemas cumple los requisitos de la aviación para las fases de vuelo de en ruta hasta aproximaciones de no precisión, pero no los cumple para la aproximación de precisión.

Los sistemas de aumentación pueden ser utilizados para cumplir con los cuatro requerimientos básicos del GNSS, establecidos en el Anexo 10 de OACI (Telecomunicaciones aeronáuticas). La integridad, disponibilidad y la continuidad, pueden ser provistos por las técnicas de aumentación de abordó (ABAS), de tierra (GBAS) o la basada en satélite (SBAS).

El sistema total, incluyendo el núcleo de las constelaciones satelitales GPS y GLONASS, y todos los sistemas de aumentación, así como los receptores, se conoce como GNSS. Los esfuerzos para traer todos los beneficios de la navegación por satélite a los usuarios de la aviación civil se centran en desarrollar los sistemas de aumentación y de certificarlos para un uso operativo.

### **3.2 Sistema de aumentación basado en satélites (SBAS)**

El sistema de aumentación basado en satélites ( SBAS de las siglas en inglés *Satellite-Based Augmentation System* ) es un concepto que comprende los sistemas de aumentación, basados en satélite que están en desarrollo actualmente, incluyendo cualquier otro que sea desarrollado en el futuro.

Los objetivos de un sistema SBAS son:

- Incrementar la integridad del sistema para cumplir con los requisitos de un sistema de navegación como medio único. Los estándares civiles requieren el aviso de falla del sistema dentro de treinta segundos cuando se está en ruta, diez segundos en una aproximación de precisión. En contraste, el sistema GPS puede tomar hasta treinta minutos para notificarle al usuario que ha fallado un satélite.
- Incrementar la exactitud del sistema GPS para cumplir con los requisitos de un medio único de navegación para aproximaciones de precisión.
- Incrementar la disponibilidad del sistema para cumplir con requisitos de un medio de navegación únicos. Actualmente la disponibilidad del sistema GPS varía entre el 95% y un 98%. Por

lo que actualmente es necesario confirmar, antes de cada vuelo en cual se desea utilizar el GPS como medio de navegación primario.

La arquitectura básica de un sistema SBAS esta conformado por: Una red de estaciones terrestres diferenciales que determinan el error total de posición en una determinada región. Esas correcciones son transmitidas al avión por medio de satélites geoestacionarios. Luego el receptor de a bordo de cada uno de los usuarios, ajusta la información recibida directamente de los satélites GPS con las correcciones recibidas de los satélites geoestacionarios, para así navegar con más precisión.

En otras palabras los sistemas de aumentación basados en satélite (SBAS) son redes de estaciones terrestres, satélites de navegación y satélites geoestacionarios. Las estaciones terrestres reciben señales de los satélites de navegación (GPS, GLONASS, GALILEO) y transmiten correcciones de mediciones de tiempo y distancia a los usuarios a través de satélites geoestacionarios, con el propósito de mejorar la exactitud del sistema.

El sistema SBAS aumenta las señales del núcleo de satélites del GNSS, es decir GPS y GLONASS, proveyendo información de distancia, integridad e información de corrección, a través de satélites geoestacionarios (GEOS, del inglés *Geostationary Earth Orbit Satellite* ). El sistema comprende:

- Una red de estaciones terrestres de referencia que monitorean las señales de satélites de navegación.
- Estaciones maestras que reciben y procesan información de las estaciones de referencia y generan mensajes.

- Estaciones de enlace satelital de subida que mandan mensajes a los satélites geoestacionarios (GEOS).
- Los correspondientes *transponders*, en estos satélites que emiten los mensajes SBAS.

Las estaciones de observación y de transmisión de corrección son situadas en posiciones conocidas alrededor del mundo, mientras los satélites geoestacionarios continuamente mantienen la misma posición respecto a un punto fijo sobre la tierra.

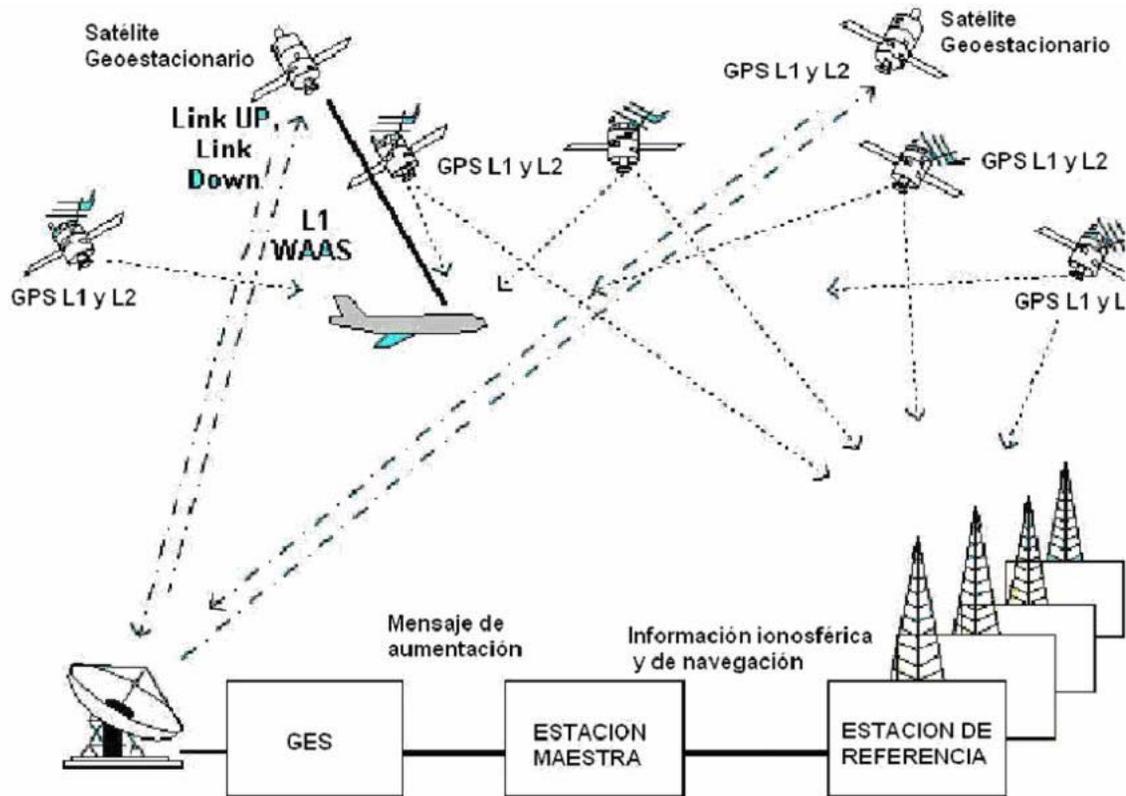
Utilizando esta información de la distancia, el SBAS corrige señales de satélites de navegación por retardos atmosféricos, posicionamiento incorrecto de satélites y baja geometría, a veces causados por alineamiento muy cercano entre los mismos, lo que resultará en un incremento de la exactitud del sistema en regiones específicas.

El modo de aumentación SBAS es vital para proveer la confiabilidad y precisión requerida por la aviación y otras aplicaciones críticas de precisión.

Al proveer correcciones diferenciales, señales extras de posicionamiento a través de satélites geoestacionarios e información de integridad para cada satélite, el SBAS entregará una disponibilidad de servicio mucho más alta que el núcleo de la constelación de satélites de navegación con el sistema de aumentación basado en aeronave (ABAS).

La figura 26 muestra un SBAS genérico con el que se pueden observar, sus diferentes componentes, así como el flujo de las señales que intervienen entre las estaciones terrestres y los satélites de navegación como geoestacionarios.

**Figura 26. Sistema de aumentación basado en satélites ( SBAS )**



Fuente: Página [www.orpac.org](http://www.orpac.org).

Existen tres niveles de servicio, de acuerdo a la capacidad de un sistema SBAS, según OACI. La tabla abajo muestra los tipos de servicio SBAS, la corrección que será provista, y el nivel más alto de servicio que será soportada por el tipo de SBAS.

**Tabla IV. Tipos de servicios de SBAS**

<b>Tipo de servicio SBAS</b>	<b>Correcciones</b>	<b>Nivel de servicio más alto soportado</b>
Estado de satélite GNSS y posicionamiento satélite geoestacionario	Sin correcciones	Hasta aproximación de no precisión
Correcciones básicas diferenciales	Reloj y efemérides	Hasta aproximación de no precisión
Correcciones diferenciales de precisión	Reloj, efemérides y de la ionósfera.	Hasta aproximación de precisión APV II

Fuente: *Global Navigation Satellite System(GNSS) Manual Appendix AN-Conf/11-IP/14 ICAO*

El tipo de servicio elegido y su correspondiente costo serán dependientes de la capacidad requerida. Un sistema que provea estado de los satélites GNSS, requiere pocas estaciones de referencia y estaciones maestras simples que proveen solo integridad.

Al proveer correcciones diferenciales básicas requiere más estaciones de referencia y más estaciones maestras complejas para generar correcciones de reloj y efemérides. Al proveer correcciones diferenciales de precisión requiere más estaciones de referencia con el objetivo de entregar correcciones ionosféricas.

Existen cuatro entidades que actualmente están en proceso de desarrollo de sistemas SBAS y fases de operación, cubriendo Norte América, Europa y Asia. Dichas entidades que hasta el momento han desarrollado sistemas SBAS

son la FAA (el WAAS), un consorcio europeo (el EGNOS) y el Estado Japonés (el MTSAS).

### **3.3 Sistema de aumentación de área Amplia**

La administración federal de aviación de los Estados Unidos (FAA) en el año 1991, inició un programa para introducir el uso del GPS para la navegación en su espacio aéreo nacional. Debido a que el GPS por si solo (sin aumentación) no cumple con todos los requerimientos que la navegación civil aérea exige, la FAA desde el año 1991 ha estado investigando sistemas de aumentación que den al GPS la total capacidad de navegación.

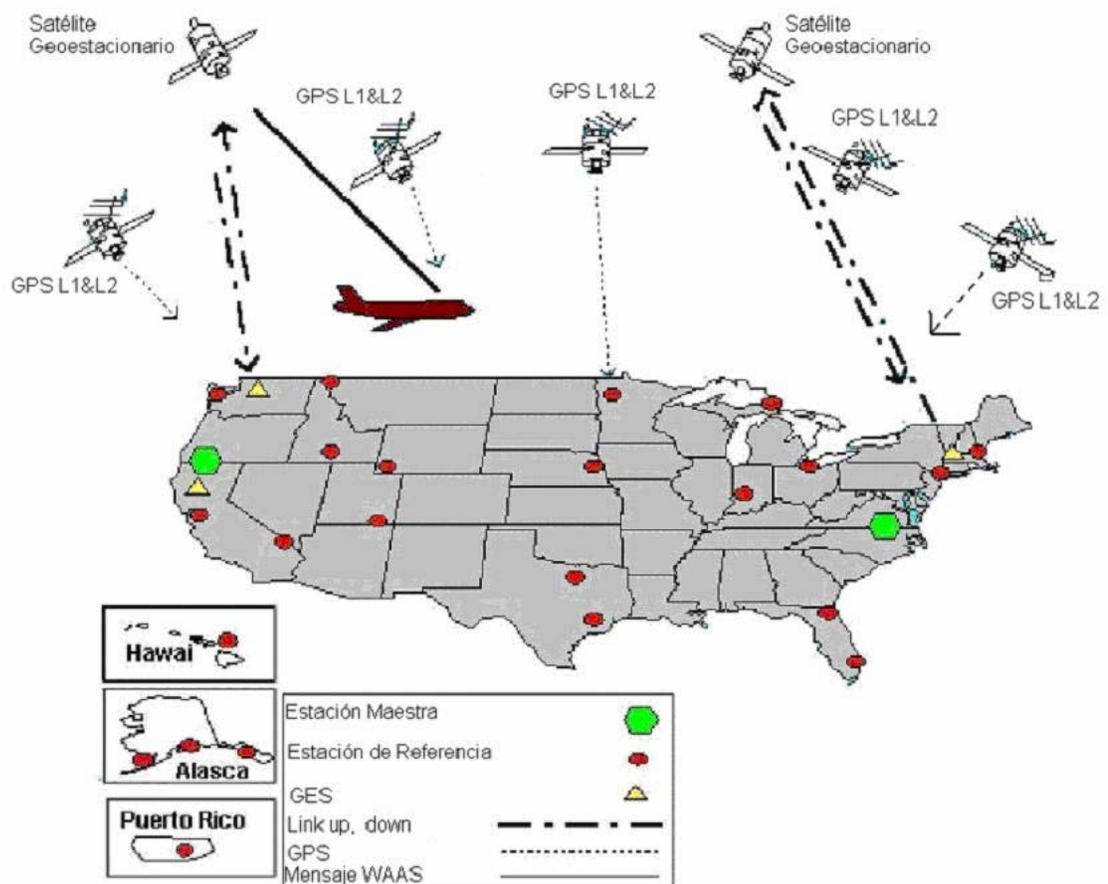
El sistema desarrollado por la FAA es denominado Sistema de Aumentación de Área Amplia o WAAS y es desarrollado para obtener, a nivel regional, la exactitud, integridad, disponibilidad y continuidad necesaria para usar el GPS como medio principal para las diferentes fases de vuelo y será suplementario para aproximaciones de precisión.

El WAAS es un sistema de navegación y aterrizaje basado en el GPS, que provee una guía precisa para las aeronaves en miles de aeropuertos y pistas de aterrizaje (en los Estados Unidos) donde no existe el aterrizaje por precisión. El sistema esta diseñado para mejorar la exactitud y asegurar la integridad de la información proveniente de los satélites GPS.

La señal del sistema WAAS puede también ser utilizada por muchas aplicaciones que no pertenecen al campo de la aviación. Muchos usuarios han utilizado la exactitud incrementada del sistema para aplicaciones como recreación, navegación marina, agricultura, etc.

La figura 27 muestra la forma en que se distribuye la red WAAS, donde en síntesis se puede observar que los satélites de navegación (GPS) envían información de posición a la aeronave y a las estaciones de referencia. Las estaciones de referencia envían dicha información a las estaciones maestras, que se encargan de procesar el mensaje de corrección para ser difundido por los satélites geoestacionarios. Las aeronaves procesan la información GPS y el mensaje de corrección para obtener coordenadas aceptables para la navegación aérea.

**Figura 27. Sistema de aumentación de área amplia WAAS**



Fuente: Página [www.orpac.org](http://www.orpac.org).

Dicho en otras palabras el WAAS funciona a través de una red de estaciones terrestres de referencia que recogen información de satélites GPS. Esta información es enviada por medio de líneas de comunicaciones terrestres arrendadas, a las estaciones maestras que analizan dicha información y preparan un mensaje de corrección WAAS, para ser transmitido a los pilotos y otros usuarios.

El mensaje de corrección es transmitido a las aeronaves y otros usuarios, con la ayuda de transpondedores arrendados en satélites de comunicaciones geoestacionarios comerciales.

Para utilizar WAAS en una aeronave, es necesario contar con receptores que reciban e interpreten el mensaje de corrección del GPS. Los receptores WAAS han sido desarrollados por la industria y ya están actualmente disponibles a la venta.

### **3.3.1 Elementos que componen el sistema WAAS**

El sistema cuenta con 24 estaciones de vigilancia o también llamadas estaciones de referencia de área amplia o WRS (*Wide-area Referente Stations*), 2 estaciones maestras o WMS (*Wide-area Master Stations*), 6 estaciones terrenas de retransmisión de datos GES (*Ground Earth Stations*) que son prácticamente los enlaces satelitales, y por último 3 satélites geoestacionarios GEO (*Geostationary Earth Satellites*).

Las 24 estaciones de vigilancia o referencia están ubicadas a una distancia aproximada de 500 millas de separación en los Estados Unidos, Alaska, Hawai y Puerto Rico. Estas supervisan las señales de cada satélite de navegación por encima del horizonte con los siguientes objetivos:

- Detección de condición de falla o señales fuera de tolerancia de los satélites.
- Determinar el error de navegación regional.

Cuando se detecta una condición de falla de un satélite, se transmitirá de inmediato una notificación a los receptores de a bordo mediante satélites geoestacionarios.

Se ha determinado la posición exacta de cada estación monitorea mediante un levantamiento geodésico muy preciso. Al recibir una señal del satélite de navegación (GPS), el sistema WAAS compara la posición real de una estación monitorea con la posición indicada por los satélites GPS que están visibles.

En la aeronave un procesador calcula la diferencia entre la posición real y la indicada por el sistema GPS. La aviónica GPS incorpora esta información diferencial en el cálculo de la posición de la aeronave, para luego navegar de una manera más exacta.

### **3.3.2 Estaciones de referencia de área amplia**

Las estaciones de referencia de área amplia o WRS ( del inglés *Wide Area Reference Station* ) están espaciadas aproximadamente de 500 a 1000 Km. La separación de las estaciones influye en el grado de precisión del sistema WAAS.

La función principal de estas es observar las señales GPS, las condiciones ionosféricas y la señal de corrección WAAS y luego transmitir los datos a las estaciones maestras.

Cada una de las estaciones bases estará compuesta por una unidad principal y dos de reserva para dar un alto grado de fiabilidad por medio de la redundancia doble.

Todas las WRS contienen al menos un receptor de frecuencia dual (L1 y L2) conectado a un oscilador de Cesio (reloj de gran precisión), un sensor meteorológico, un procesador y hardware de red para transmisión de datos *ethernet* hacia las estaciones maestras.

### **3.3.3 Estaciones Maestras de área amplia**

Las estaciones maestras de área amplia o WMS (del inglés *Wide area Master Station*), verifican las señales provenientes de las WRS anteriores y generan una nueva señal de corrección WAAS. Esta señal de corrección es transmitida a través de las estaciones terrenas a los satélites geoestacionarios, como los de Inmarsat o satélites exclusivos para ser transmitidos a los receptores.

Las WMS son responsables por filtrar todas las observaciones GPS hechas desde los receptores de referencia, estimando los estados de los modelos de error ionosférico, de reloj, efemérides etc. Además generan finalmente los mensajes WAAS (trama de 250 bits) que son enviados y aplicados a los cálculos de la posición hechos en los receptores WAAS a bordo de las aeronaves.

Las estaciones de referencia también mostrarán información de la condición actual de la constelación de satélites GPS al operador.

### **3.3.4 Estaciones de comunicaciones**

Las estaciones de comunicaciones o GES ( del inglés *Ground Earth Station* ) son estaciones terrenas que se encargan de recibir la trama WAAS de corrección de las estaciones maestras de área amplia (WMS) y retransmitirla a los satélites geoestacionarios. Estos últimos se encargan de transmitir las correcciones hacia los receptores WAAS, como la radiodifusión.

### **3.3.5 Satélites geoestacionarios**

Los satélites geoestacionarios o GEO (del inglés *Geostationary Earth Orbit* ) transmiten la señal de corrección en la banda de frecuencia L1 del GPS, pero usan un código pseudo-aleatorio (PRC) diferente al de los satélites GPS. Las antenas receptoras del WAAS podrían aparentemente ser incorporadas directamente en el receptor GPS.

Puesto que el sistema debe brindar integridad, disponibilidad, continuidad y precisión, los desarrolladores de esta tecnología han pensado en el uso de satélites Geoestacionarios de uso exclusivo para el sistema. Estos satélites transmiten las correcciones como la radiodifusión (es decir a un número ilimitado de aparatos receptores).

### **3.3.6 Receptores**

Los receptores del sistema WAAS son receptores que no solo procesan la información GPS (provenientes de los satélites de navegación) sino que también procesan las correcciones WAAS, estas últimas vienen en un formato de trama de 250 bits.

Las correcciones WAAS recibidas son aplicadas a los resultados de los cálculos de la distancia (por medio de la triangulación), para luego determinar la posición corregida de las aeronaves por el sistema de aumentación.

Los nuevos equipos receptores integrarán la nueva tecnología de ayuda a la navegación, basada en las señales de satélite aumentada, reemplazando a las radioayudas actuales como lo son DVOR, CVOR, DME y NDB.

### **3.3.7 Beneficios**

A continuación se presentan los beneficios más importantes que el sistema brinda:

- Provee una guía tridimensional para aproximaciones de precisión a las aeronaves dentro de su radio de operación.
- Mejora significativamente los instrumentos bidimensionales de navegación existentes que o pueden proveer referencias verticales precisas a los pilotos.
- Gran precisión y disponibilidad para aproximaciones de precisión, además de un monitoreo integral para la seguridad del sistema GPS y apoyo a las operaciones de vuelo.
- Reduce las posibilidades de accidentes contra tierra durante vuelos controlados y aproximaciones.
- Elimina los costos asociados en el mantenimiento de los instrumentos de navegación más antiguos con base terrestre tal como los NDB, VOR, DME e ILS para aproximaciones de precisión.
- Reduce el número de piezas de equipos a bordo de la aeronave y requiere solo un pequeño receptor montado en la cabina y una antena.

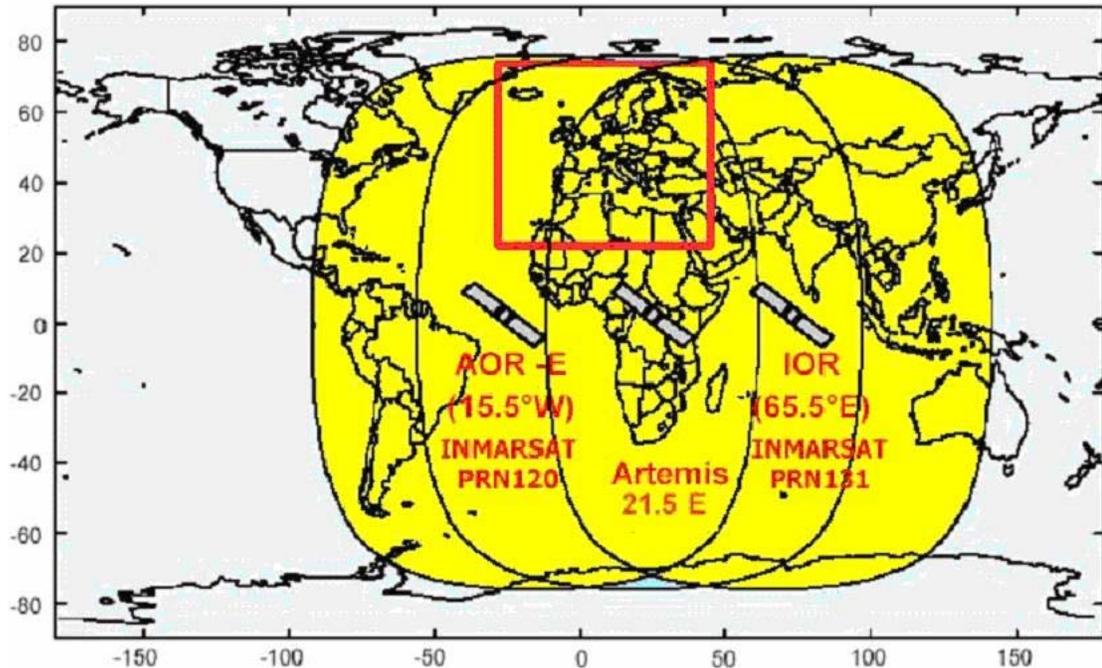
- Permite reducir los estándares que gobiernan la separación entre aeronaves en vuelo, por lo que en consecuencia puede alojarse mayor número de ellas en un espacio dado, sin aumentar los riesgos.
- Ahorro de combustible haciendo posible vuelos más directos y aproximaciones más seguras.

### **3.4 Sistema EGNOS**

Debido a las inversiones hechas por una gran variedad de usuarios y con el objetivo de desarrollar el uso de las señales de navegación, Europa ha decidido aplicar un GNSS inicial sobre la base de un aumento regional del GPS y el GLONASS, e iniciar al mismo tiempo una labor preparatoria con miras a un sistema complementario.

La contribución europea al GNSS se basa en la utilización de cargas útiles de navegación en satélites geoestacionarios (dos Inmarsat-3 y Artemis de la agencia espacial Europea) y se conoce como EGNOS. Con el sistema EGNOS, se suplirán las necesidades de navegación de la aviación civil en todas las fases de vuelo, desde vuelo en ruta hasta la precisión en la aproximación hacia los aeropuertos y el aterrizaje.

Figura 28. Satélites geoestacionarios del EGNOS



Fuente: Presentación EGNOS TUTORIAL de *Research group of Astronomy and Geomatics Universitat Politècnica de Catalunya*. <http://gage1.upc.es/>

Los satélites Inmarsat-3 están equipados con transpondedores de navegación para recibir, desde una estación en tierra, señales de navegación GPS y el GLONASS que luego se transmiten a los usuarios. El conjunto para navegación constará de cuatro servicios diferentes: i) vigilancia de la integridad; ii) aumento de la telemetría geoestacionaria; iii) correcciones diferenciales de zona amplia y iv) referencia temporal precisa.

El sistema EGNOS es también un sistema de aumentación basado en satélite. El EGNOS (del inglés *European Geostationary Navigation Overlay Service*), es el servicio geoestacionario complementario Europeo, es la primera experiencia Europea dentro del campo de la navegación por satélite.

Este nuevo sistema aumentará los dos sistemas militares de navegación por satélite que operan actualmente, es decir el GPS de los Estados Unidos y el GLONASS Ruso. Su objetivo principal será convertir en adecuados, estos dos servicios para aplicaciones de seguridad crítica como en la navegación aérea o la navegación de naves a través de canales angostos.

El EGNOS es un proyecto de un grupo tripartita de los cuales son miembros:

- La agencia Europea Espacial (ESA)
- La organización Europea para la seguridad de la navegación aérea (EUROCONTROL).
- La comisión de la unión Europea.

Trabajando juntos, las tres entidades son conocidas como el Grupo Tripartita Europeo (ETG).

El ETG firmó el 27 de junio de 1996 el alquiler para los primeros dos transpondedores de navegación que son usados para brindar señales *broadcast* a los usuarios del sistema EGNOS. Estos transpondedores están instalados en dos satélites Inmarsat-III, localizados en las longitudes 65.5 Este (Región Océano Indico IOR) y 15.5 Oeste (Región Océano Atlántico AOR)

La Agencia Espacial Europea (ESA) tiene la responsabilidad del diseño y desarrollo del sistema. Esta ha firmado un contrato con un consorcio encabezado por Alcatel Espacial de Francia para su desarrollo. Cuando EGNOS se encuentre operando normalmente, un operador será elegido para asumir las responsabilidades de sus operaciones diarias.

La función de Eurocontrol es definir las necesidades de la aviación civil, y además jugará un papel de mayor importancia en la prueba del sistema. Además de esto, varios operadores de aviación civil y otras organizaciones están apoyando el desarrollo, prueba e implementación de EGNOS.

La comisión Europea es responsable de la cooperación internacional, coordinación y aseguramiento de que todas las necesidades alimenten la información necesaria para cumplir con el diseño e implementación del proyecto.

El costo del diseño, desarrollo y validación costará alrededor de 300 millones de Euros. La Agencia Espacial Europea contribuye con 200 (los estados miembros y las aviaciones civiles de cada país) y la comisión Europea con 100.

El sistema EGNOS provee una señal de navegación que es ideal para el uso de aeronaves, barcos, trenes y otras formas de transporte. En comparación con otros sistemas como el WAAS de los Estados Unidos y el MTSAT Japonés, los que estarán dedicados exclusivamente a la navegación aérea.

Se espera que el tráfico de las aerolíneas comerciales del mundo se duplique en los siguientes 20 años. Lo cual resultará en rutas con más carga de trabajo, utilización de más combustible y retrasos. En consecuencia lo anterior tendrá un costo de millones de dólares anualmente.

EGNOS esta diseñado para asistir a la navegación aérea tanto en ruta como en el aterrizaje/despegue. Sus beneficios serán el ayudar al control de

tráfico para contrarrestar el incremento de naves aéreas, como también la mejora a la seguridad y la reducción de la infraestructura necesaria en la tierra.

A pesar que todos los sistemas de aumentación basados en satélite (SBAS) son sistemas regionales, es muy importante asegurar que deben ser compatibles y de que los proveedores cooperen y coordinen sus acciones con sus homólogos (contrapartes de otras regiones).

La compatibilidad de cada sistema los harán más efectivos y asegurará que todos los sistemas pueden ser integrados en un sistema de navegación mundial sin ninguna región sin cubrir.

La cooperación de los sistemas de aumentación basados en satélite es actualmente coordinada a través de los grupos de trabajo de inter-operación, tales como EGNOS/WAAS y EGNOS/MSAS. Las pruebas de inter-operación, de un sistema con el otro, tuvieron lugar en los años 1998, 1999 y 2000.

Se prevé que la segunda generación del GNSS esté bajo control civil y se adecue a las necesidades a largo plazo de las comunidades de usuarios civiles y al aumento del rendimiento de la navegación, y que siga manteniendo su compatibilidad con el GPS y el GLONASS.

El desarrollo del EGNOS cubre una gran área y envuelve varios países y diferentes organizaciones.

Por medio de la corrección de señales de los sistemas de posicionamiento global, el sistema EGNOS ofrece una exactitud de menos de dos metros, comparados con la exactitud entre 15 y 20 metros provistos por el

GPS. Se logra esto por medio de una red de elementos terrestres, los cuales se encuentran actualmente instalados sobre toda Europa.

Los elementos que hacen el sistema incluyen:

- Estaciones de monitoreo de integridad y posicionamiento (RIMS del inglés *Ranging and Integrity Monitoring Stations*) que recogen las señales GPS o GLONASS,
- Centros de control maestro (MCCs del inglés *Master Control Centres*) para procesar la información provista por las RIMS.
- Estaciones de enlace satelital de subida que envían la señales a tres satélites geoestacionarios, para retornarlos después a los usuarios sobre la tierra.

El prototipo de EGNOS es el llamado ESTB (del inglés *Egnos System Test Bed*), que ha estado funcionando desde febrero del año 2000. Dicho prototipo es usado para apoyar y probar el desarrollo del sistema, para demostración a sus usuarios potenciales, para preparar su introducción y probar la posibilidad de expandir el sistema afuera de Europa.

El ESTB provee a los usuarios con una señal GPS aumentada que los posibilita calcular sus posiciones hasta una exactitud dentro de pocos metros. La arquitectura del ESTB consiste de los segmentos espacial, terrestre y de usuarios.

El segmento terrestre esta compuesto de estaciones de referencia, centros de procesamiento, una red de comunicaciones, etc. El segmento espacial esta compuesto de transpondedores a bordo de los satélites Inmarsat – III de la región del océano indico. Respecto del segmento de los usuarios ya

se encuentran en el mercado diferentes receptores, como también la empresa *Thales Avionics* desarrolló un receptor específico para la prueba del ESTB.

Los usuarios del sistema de navegación por satélite en Europa, por el día de hoy no tienen otra alternativa que usar el sistema GPS (de origen de los U.S.A) o bien el GLONASS (de origen Ruso). Sin embargo los operarios militares de ambos sistemas no ofrecen ninguna garantía de mantener un servicio sin interrupciones.

Por las razones anteriores, Galileo será el sistema de navegación global por satélite, que proveerá una alta exactitud y garantizará un servicio de posicionamiento global bajo el control civil. Además será ínter operable con el GPS y GLONASS, los otros sistemas de navegación global por satélite.

Con este nuevo sistema un usuario podrá leer su posición con el mismo receptor de cualquiera de los satélites de navegación en cualquier combinación. Por medio de ofrecer como estándar el sistema en doble frecuencia, el Galileo entregará una exactitud de posicionamiento aproximada en el rango de un metro, lo cual no se encuentra disponible en la actualidad.

Cuando el sistema Galileo este completamente desarrollado consistirá de 30 satélites (27 operacionales y 3 activos como repuesto), posicionados en tres planos de orbita media a una altitud de 23,222 Km sobre la tierra. Dichos planos orbitales estarán inclinados a 56 grados respecto al plano ecuatorial.

Cuando esto sea logrado las señales de navegación Galileo proveerán una buena cobertura aún hasta latitudes arriba de los 75 grados norte. El gran número de satélites con la optimización de la constelación y la disponibilidad de

tres satélites activos de repuesto asegurará que la pérdida de un satélite no tenga efecto en el segmento usuario.

Se investigó en la página de la ESA (Agencia Espacial Europea, [www.esa.int](http://www.esa.int)), en el mes de septiembre del presente año, y en su versión actualizada el proyecto Galileo está planeado en tres fases:

- La fase de desarrollo y validación (2001-2005), que considera la formulación de los requerimientos de la misión, desarrollo de los satélites y componentes terrestres.
- La segunda fase (2006-2007), que es la construcción y lanzamiento de satélites como la instalación del segmento terrestre.
- La última fase de operación comercial (2008).

### **3.5 Sistema de aumentación basado en tierra**

Los sistemas GPS y GLONASS, aumentados con el SBAS, están limitados a las aproximaciones de categoría I. Por esta razón está en desarrollo un sistema de mayor precisión, el cual es el sistema de aumentación basado en tierra (GBAS, de las siglas *Ground Based Augmentation System*), con este se tendrá una precisión en las aproximaciones de categoría II y categoría III.

El GBAS funciona de la siguiente manera: Una estación diferencial es instalada en o cerca de un aeropuerto, con un conocimiento muy preciso de su posición. La estación GBAS está conformada por un receptor y un procesador que comparan la posición real de la estación con la posición obtenida por los satélites visibles.

Las correcciones diferenciales son transmitidas directamente al receptor de a bordo mediante un enlace de datos VHF. Se están desarrollando los sistemas GBAS para uso local con coberturas entre los 20 y 30 millas de la estación diferencial. Por lo que como resultado se tiene un sistema de mayor precisión que el SBAS.

Si no hay terreno ni obstáculos que impidan la vista libre a la estación diferencial, es posible desarrollar un grado de precisión hasta el llamado de CAT III para todas las cabeceras de las pistas de aterrizaje dentro del área de cobertura.

Los sistemas GBAS se diferencian de los SBAS, en que los primeros no dependen de los satélites Geoestacionarios, porque el GBAS no esta diseñado para prestar el servicio sobre amplias áreas geográficas. La razón de lo anterior es que los mensajes de corrección que el GBAS envía a las aeronaves pierden validez conforme las aeronaves se alejan del aeropuerto donde los equipos GBAS están instalados.

El área de cobertura del sistema GBAS en la cercanía del aeropuerto (entre 20 y 30 millas) es mucho mejor que la del SBAS, probablemente tan buena que soporta aterrizajes de categoría II y III, y es capaz de guiar a las aeronaves en aterrizajes automáticos. Esta área de cobertura esta más allá de las alcance de los sistemas basados en los satélites Geoestacionarios.

### **3.6 Sistema de aumentación de área local (LAAS)**

El departamento de defensa (DoD) de los Estados Unidos autorizó el desarrollo de la tecnología GBAS para las áreas locales (coberturas menores a 30 millas). Se esta implementando esta tecnología denominándola Sistema de

aumentación de área local (LAAS, del inglés *Local Area Augmentation System*).

Según la FAA ( *Federal Aviation Administration*, [www.faa.gov](http://www.faa.gov) ) de los Estados Unidos, el LAAS es un sistema de aumentación para el GPS que enfoca su servicio en el área aeroportuaria (aproximadamente entre 20 y 30 millas de radio). Transmite su mensaje de corrección a través de un enlace de radio VHF de datos de una estación terrestre. El LAAS producirá extremadamente alta precisión, disponibilidad e integridad necesarios para todas las aproximaciones de precisión.

La exactitud esperada de LAAS es menor de 1 metro tanto horizontal como verticalmente. A diferencia de los sistemas de aterrizaje actuales, este sistema tiene el potencial de proveer aproximaciones a las pistas de aterrizaje dentro de su área de cobertura.

En adición, las entidades controladoras del tráfico aéreo se beneficiaran con la reducción de costos asociados a la adquisición de una variedad de equipo de radionavegación, es decir radioayudas.

Potencialmente, el sistema WAAS y el LAAS podrían utilizar la misma aviónica para lograr los objetivos de ambos sistemas, reducir los costos de mantenimiento gastados en aviónica y poder ahorrar en el entrenamiento de la tripulación.

### 3.6.1 Partes del sistema LAAS

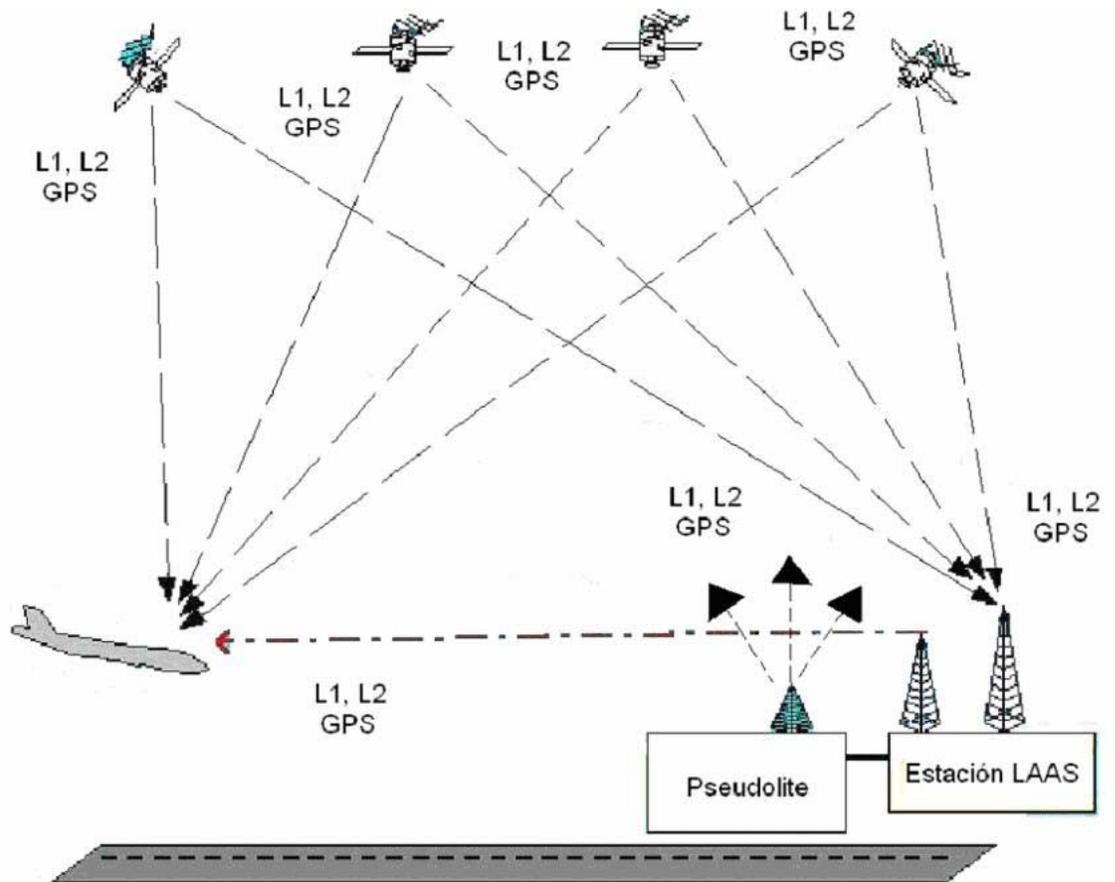
Los bloques fundamentales que componen el sistema son:

- Estaciones de Referencia de área local: Las estaciones de referencia del LAAS son instaladas en localizaciones precisas en los aeropuertos, estas reciben y recolectan la información de posición del GPS. La información GPS es luego enviada a la estación de proceso central. Según la FAA se recomienda que las estaciones de referencia sean cuatro.
- Estación de proceso Central de área local: Se encarga de recibir la información de las estaciones de referencia y las compara con posiciones conocidas calculadas en forma precisa, de aquí es determinado el error del sistema GPS.
- Transmisor de datos de área local: Es un transmisor VHF de datos que opera en la banda aeronáutica de 118 MHz hasta 136 MHz, también pueden operar en la banda C (de 4 a 6 GHz). Este recibe la información de corrección de la estación de proceso del LAAS y la retransmite en todas las direcciones. Si no existe ninguna clase de obstáculos que impidan a las aeronaves recibir las correcciones se podrán realizar las aproximaciones de precisión para todas las cabeceras de pista en el área cubierta por el sistema.
- Pseudo-satélites: Un pseudo-satélite o *pseudolite* funciona con el principio del GPS diferencial (DGPS), esta estación es emplazada en tierra y transmite señales GPS al igual que los satélites GPS

actuales, y es usada por las aeronaves que se encuentren en el área de cobertura para calcular su posición GPS. Mayormente estos se encargan de garantizar y mejorar la disponibilidad del servicio provisto por el LAAS en todo momento.

En la Figura 29 se hace un bosquejo del sistema completo LAAS con cada una de sus partes. A partir del esquema se puede ver la forma en que se encuentran relacionadas cada una de las partes, explicadas en los puntos anteriores.

**Figura 29. Sistema de aumentación de área local LAAS**



Fuente: Página [www.orpac.org](http://www.orpac.org).

### **3.6.2 Objetivos y requerimientos del LAAS**

La ventaja principal del sistema LAAS es que puede ser utilizado para aproximación de precisión. El LAAS debe servir como complemento a los sistemas SBAS descritos anteriormente (desde el punto 3.2 al 3.4). Por ejemplo, estos sistemas deberán ser instalados en aeropuertos donde los SBAS tengan mayores exigencias o limitaciones tales como: Zonas polares, lugares donde no exista una buena cobertura por los satélites y no haya la suficiente recepción.

Sus aplicaciones se pueden dar en aeropuertos localizados en zonas lejanas como lo son islas, donde solo una estación de referencia censa las señales GPS, o bien en un área extensa de red SBAS muy amplia y dispersa.

El LAAS puede ser utilizado en aeropuertos donde la demanda de tráfico, es muy alta y justifica su disponibilidad, y en ubicaciones donde es necesaria una alta calidad de los sistemas de navegación pero que no pueden ser suministrados por los sistemas convencionales. Los aeropuertos situados en valles y que se encuentran rodeados por lugares muy montañosos, son otro ejemplo.

Según la organización ORPAC la encargada de la navegación aérea en Perú, las categorías y valores para el sistema LAAS, se encuentran bajo estudio y están basados en los sistemas de aterrizaje por instrumento actuales (ILS). A continuación se presenta la Tabla V, que contiene información de categorías y requerimientos con valores estimados del LAAS.

**Tabla V. LAAS – Objetivos y requerimientos**

<b>Categoría</b>	<b>Nivel de Decisión</b>	<b>Precisión Vertical</b>	<b>Riesgo de Integridad</b>	<b>Riesgo de continuidad</b>
I	> 200 pies	14.5 mts	-	-
II	> 100 pies y < 200 pies	6.1 mts	$1.05 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-6}$
III	< 100 pies	2.1 mts	$0.5 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-6}$

Fuente: Página [www.orpac.org](http://www.orpac.org).

Las categorías de la tabla están basadas en las definiciones dadas por el manual anexo 6 de la ICAO, referente a la operación de aeronaves. El nivel de decisión, de la tabla V, se define como una altitud específica en una aproximación de precisión en el que un procedimiento de aproximación abortada debe ser iniciado si la requerida referencia visual no ha sido establecida.



## **4. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE EN GUATEMALA PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA**

### **4.1 Sumario**

Este capítulo trata de la conclusión, del presente trabajo de graduación. Su resultado es una solución propuesta de una necesidad de Guatemala. Es decir la necesidad de implementar en un futuro cercano la migración, de sistemas de navegación aérea, basados en radioayudas convencionales a los basados en satélite.

El planteo de la solución es un diseño genérico o plan general. No se pretende resolver dando especificaciones de cada uno de los equipos, sino que solamente generalidades. El hecho de proporcionar generalidades, facilitará la comprensión de la mayoría de estudiantes de telecomunicaciones, acerca del tema.

La forma en que se desarrolla la solución se dividió en tres aspectos o temas, relacionados mutuamente. Estos aspectos son: La administración, el hardware y el software. El tema de la administración, es acerca de la organización o entidad gubernamental más recomendable para trabajar en la migración. Hasta la fecha las administraciones que tienen que ver con lo relativo al espacio aéreo, es decir con las telecomunicaciones aeronáuticas, son la dirección general de aeronáutica civil y la corporación centroamericana de servicios de navegación aérea (COCESNA).

El hardware se refiere a las estaciones que se usarán para resolver la necesidad, dando sus coordenadas y las correspondientes definiciones de sus tipos de estaciones. Mientras que el software, es acerca de las funciones que debe realizar todo el sistema en conjunto. Como mostrando el proceso al que se someten las señales, para poder obtener el producto final, un sistema que proporcione un servicio de navegación aérea basado en satélite.

En la solución propuesta no se pretende profundizar, como lo haría una industria especialista que diseña, fabrica e implementa, en el campo de las telecomunicaciones aeronáuticas. Sino que solamente proporcionar los fundamentos o lineamientos teóricos para una comprensión global del GNSS, para luego poderlo implementar en nuestro país.

En nuestro país sí se cuentan con señales generadas por sistemas de navegación por satélite, tal como lo son el GPS y el GLONASS. Sin embargo para la navegación aérea específicamente, estos no conforman totalmente el GNSS.

Según la OACI, en su anexo 10 (Telecomunicaciones Aeronáuticas) el servicio de navegación GNSS, será provisto a través de combinaciones de elementos instalados sobre la tierra, en satélites y a bordo de las aeronaves. Estos elementos son: El núcleo, que son las constelaciones de satélites de navegación; un sistema de aumentación, que puede ser ABAS, SBAS y GBAS (ver glosario); y los receptores instalados a bordo. Por esa razón surge la necesidad de proponer un sistema de navegación aérea basado en satélite (GNSS) en Guatemala.

La OACI propone un proceso evolutivo hacia el plan mundial de navegación aérea basado por satélite. Este plan recomienda que la implementación a las nuevas tecnologías sea gradual, hasta establecer que los nuevos sistemas operan con el suficiente rendimiento en cuanto a seguridad aeronáutica. También recomienda un retiro gradual de los sistemas actuales. Sin embargo no así el retiro de todas las radioayudas.

#### **4.2 Transición al GPS genérico aumentado**

Cuando se realizó la planificación del presente trabajo de tesis, se consideró que el GPS (del inglés Global Positioning Service) al que se refiere este punto (4.2) era un servicio de posicionamiento global genérico. En el segundo capítulo se estudio que estrictamente el GPS es el servicio de posicionamiento global, desarrollado y administrado por el departamento de la defensa de los Estados Unidos.

Por lo que es importante no confundir, el objetivo de este punto. Es decir que nos referimos a un sistema de localización mundial genérico y no específicamente al GPS de los Estados Unidos.

El objetivo del presente capítulo es: mostrar las recomendaciones dadas por los estándares internacionales, en lo referente a la transición de la navegación aérea basada en los sistemas actuales a los basados en satélite. En palabras mucho más sencillas y más específicas este punto trata de la transición al GNSS.

Como recordatorio el GNSS propone el uso de las constelaciones de sistemas de localización mundial, tales como GPS, GLONASS, GALILEO y los

que se desarrollen en el futuro, mejoradas a través de sistemas de aumentación, como apoyo a la navegación aérea.

Dicho en otras palabras el GNSS total esta compuesto de un núcleo, una o más constelaciones de satélites de navegación, aviónica en aeronaves y un sistema de tierra para monitorización, con aumentación como se requiera para la navegación aérea.

La aumentación es necesaria debido a que los sistemas de localización mundial, no cumplen con los requisitos tan estrictos que la navegación aérea exige. Los cuatro requisitos están definidos por la OACI como la Exactitud, Disponibilidad, Integridad y Continuidad, que pueden buscarse dentro del glosario de este trabajo.

De acuerdo a la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y lo referente al manual del GNSS, este debe cumplir con los siguientes puntos generales:

- Sostener la meta de una transición al GNSS de manera evolutiva, es decir que a través de pequeños cambios se logre integrar a los nuevos sistemas. Según esto con el GNSS se eliminará la necesidad de las actuales radioayudas terrestres.
- Preservar la necesidad de mantener algunas o todas las radioayudas terrestres durante el período de transición.
- Enfatizar que la necesidad de mantener las radioayudas tradicionales, no implica que se agreguen más de éstas. Lo anterior se refiere al período de transición a los nuevos sistemas en áreas con menos infraestructura para la navegación.

Nota:

El plan de la transición al GNSS, esta expuesto en el manual del GNSS ( localizado en el [www.icao.int](http://www.icao.int) y buscar como “ gnss manual “ ).

Las decisiones de los estados participantes en la implementación del GNSS, de acuerdo a la OACI, deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones de mayor importancia:

- Que el GNSS cumpla todos los requisitos, en particular el nivel de disponibilidad de servicio para ciertas operaciones o fases de vuelo, considerando temas como diseño del sistema e interferencia.
- Que los usuarios estén equipados, o estén a cargo de equiparse con aviónica GNSS antes de las fechas correspondientes en las que se retirará del servicio a las actuales radioayudas terrestres.

### **4.3 Retiro gradual de sistemas convencionales**

Para la migración de los sistemas de navegación basados en radioayudas a los basados en satélite, será necesario que uno de los dos sistemas cumpla con los requisitos que la aviación civil exige. Por lo que el proceso de la migración implicará que uno de los sistemas crezca (el basado en satélite) y el otro decrezca (el basado en radioayudas terrestres).

El sistema actual dejará de funcionar pero cuando la disponibilidad del nuevo sistema halla alcanzado el nivel de seguridad óptimo.

Sin embargo podría siempre existir la necesidad de mantener algunas estaciones de radioayudas terrestres. Por ejemplo si el riesgo de interferencia es alto, será necesario y preferible mantener un respaldo basado en tierra.

En cualquier caso, el GNSS traerá beneficios operacionales a los usuarios, y será posible el retiro de la navegación basada en las estaciones terrestres, que soportan operaciones específicas en áreas específicas.

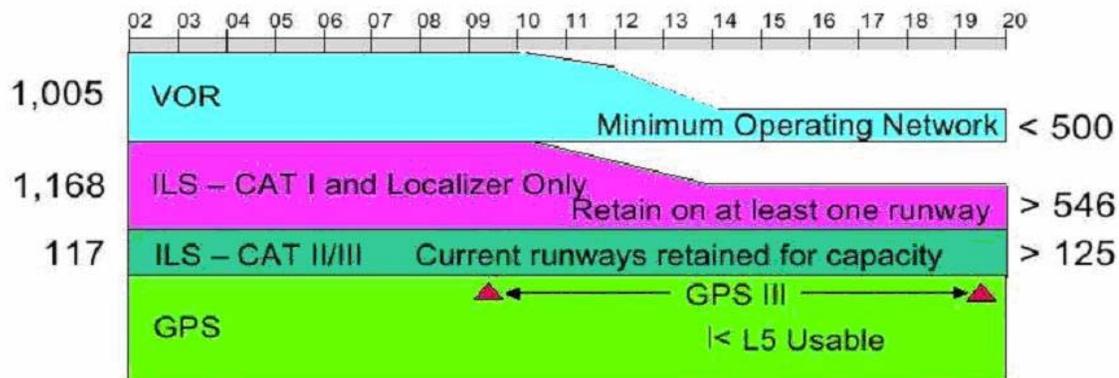
El GNSS tiene el potencial de reemplazar todas las ayudas terrestres, sin embargo un alto grado de trabajo es necesario para resolver todos los temas relacionados al concepto general. Como parte del proceso en el que se desarrollará este proyecto mundial, será necesario resolver cada uno de los temas paso a paso de manera evolutiva, tal y como lo dicta la OACI.

#### EL PLAN DE LA FAA

Para citar un ejemplo la FAA de los Estados Unidos, la organización encargada de administrar el espacio aéreo en dicho país, tiene proyectado reducir las radioayudas VOR a un 50% de las actuales para el año 2014. Es decir que desde la fecha del 2002 hasta el 2010, está proyectando mantener una cantidad de mil cinco estaciones VOR y que para las fechas a partir del 2014 tiene proyectada una cantidad menor a los 500.

Lo anterior se investigó de una presentación acerca de la estrategia de transición de los servicios de navegación y aterrizaje que presta, y que aparece en forma gráfica en la siguiente figura.

**Figura 30. Transición de los servicios de radioayudas, proyectados por la FAA de los E. U.**



Fuente: Presentación de la FAA.

A partir de lo proyectado por la FAA se observa que para el año 2003, había cerca de mil radioayudas VOR. Y de acuerdo a esta administración no tiene proyectado eliminar todas las radio-facilidades VOR, sino que reducirlas a aproximadamente un 50%.

#### RECOMENDACIÓN DE LA OACI EN DOCUMENTO 8733

Dentro de la búsqueda de información para éste tema se encontró en la recomendación de la OACI el documento 8733, que trata del Plan de Navegación Aérea para las regiones del Caribe y Suramérica, en cuya región se encuentra Guatemala.

La recomendación que señala la OACI, en éste mismo documento, explica los sistemas actuales y los futuros sistemas relativos a la navegación aérea. La Tabla VI muestra en forma resumida el proceso de la evolución de los sistemas actuales a los futuros.

Para realizar esta tabla se tomo como referencia la tabla expuesta en el manual del Plan de Navegación Aérea. Se extrajo solamente lo referente a los sistemas de navegación. Podemos mencionar que dentro de los sistemas actuales se tienen el ILS, NDB y las estaciones VOR/DME, tal como fue estudiado en el primer capítulo.

Los sistemas actuales van a desaparecer en el futuro para todos los casos, excepto para las áreas terminales con una alta densidad de tráfico. La evolución de los sistemas de navegación constituye una visión de largo plazo para las regiones del Caribe y Suramérica, en las que esta incluida Guatemala, según la OACI. La Tabla VI describe el equipo de los sistemas actuales y futuros bajo diferentes ambientes de operación.

**Tabla VI. Evolución de los sistemas de Navegación Aérea**

Función	Sistema Actual	Sistema Futuro
Espacio aéreo Continental/Oceánico con baja densidad de tráfico (nota 6)		
Navegación	NDB VOR/DME	GNSS
Espacio aéreo Continental con alta densidad de tráfico		
Navegación	NDB VOR/DME	GNSS
Espacio aéreo Oceánico con alta densidad de tráfico		
Navegación	Ningún sistema terrestre aplica para esta fase de vuelo.	GNSS
Áreas Terminales con alta densidad de tráfico		
Navegación	NDB VOR/DME ILS	GNSS ILS, NDB (Nota 3) VOR/DME (Nota 3)

Nota 3: Serán retiradas progresivamente

Nota 6: Depende de los resultados de estudios de viabilidad

Fuente: Tabla tomada del documento 8733, el Plan de Navegación Aérea para las regiones del Caribe y Sudamérica.

## **4.4 Propuesta de aumentación**

### **4.4.1 Elección del tipo de aumentación**

Una comparación entre las prestaciones del servicio GPS y lo necesario para la aviación civil según la OACI se muestra en la tabla III del capítulo 3. En dicha tabla se muestran los cuatro requisitos que exige la aviación civil. Para los que no cumple ni aún para la exactitud, el sistema GPS de los Estados Unidos. Por esta razón es necesario implementar un tipo de aumentación para nuestra región. La región para la cual aplica Guatemala es la FIR Centroamericana tal como se mostró en la Figura 15.

Como recordaremos un sistema GNSS esta compuesto de un núcleo, es decir una constelación de satélites de navegación; un sistema de aumentación y los correspondientes usuarios del sistema.

A partir de que el núcleo es la base del sistema de navegación para la aviación, los resultados de este último serán en gran manera influyentes para la eficiencia del sistema propuesto. Analizaremos las ventajas y desventajas, de las diferentes constelaciones de satélites de navegación, en la siguiente tabla.

**Tabla VII. Comparación entre los posibles núcleos del GNSS  
propuesto para la región correspondiente a Guatemala**

Sistema de navegación	GPS	GLONASS	GALILEO
Origen de la administración y estado operativo	Sistema controlado por el departamento de defensa de los estados Unidos. Operativo. Nota 1. (militar).	Sistema operado por las fuerzas espaciales Rusas. Operativo. Nota 2. (militar).	Sistema Europeo de alta precisión bajo control civil. En desarrollo. Nota 3.
Número total de satélites	24	24	30
Exactitud	10 - 25 mts (nota 4)	50 - 70 mts ( nota 6)	1 mts (nota 5)
Interoperatividad	No ofrecida	No ofrecida	Ofrecida

Nota 1: Se puede encontrar mayor información en el punto 2.2 del presente trabajo.

Nota 2: Se puede encontrar mayor información en el punto 2.8 del presente trabajo.

Nota 3: Para mayor información se puede consultar la página de la web [www.esa.int](http://www.esa.int)

Nota 4: Consultar punto 2.6 del presente trabajo y Tabla III

Nota 5: Para mayor información consultar la página de la web [www.esa.int](http://www.esa.int)

Nota 6: Basado en la Tabla II

Analizaremos las ventajas y desventajas, de los diferentes sistemas de constelaciones de satélites de navegación respecto a cuatro parámetros generales en la Tabla VII. En ésta se presentan características generales de los diferentes sistemas de localización global, tanto los ya desarrollados como el GPS y GLONASS, como el que aún se encuentra en fase de desarrollo como el GALILEO.

El primer criterio que se eligió para compararlos en esta tabla es el origen de la administración, es decir militar o civil; así como su estado, es decir operativo o en desarrollo. Cabe mencionar que cuando el sistema de defensa de un determinado país entra a funcionar, hará todo lo posible por defender su territorio. Es decir que sí en un futuro es necesario apagar o codificar las señales de navegación, sus administradores militares no vacilarán en hacerlo.

Si a cada uno de los criterios le asignamos un valor numérico desde cero hasta dos, para cada una de las constelaciones, se tiene como resultado la Tabla VIII.

**Tabla VIII. Resultado de la comparación entre los posibles núcleos del GNSS propuesto para la región correspondiente a Guatemala**

<b>Sistema de navegación</b>	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>GALILEO</b>
Origen de la administración	1	1	1
Número total de satélites	2	2	2
Exactitud	1	0	2
Interoperatividad	0	0	2
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>7</b>

En relación al primer criterio a los sistemas GPS y GLONASS se les calificó con un punto por ser administrados por organismos militares, mientras que a GALILEO se le asignó un punto por estar aún en desarrollo, el que estará en operación en el 2008, según punto 3.4 y página 69 (página web [www.esa.int](http://www.esa.int) ).

Respecto al número total de satélites, se les asignó dos puntos a cada uno por contar con una cantidad de satélites suficiente y que incluyen satélites de repuesto.

En relación a la exactitud, ofrece una mejor calidad el sistema europeo Galileo, así como en la interoperatividad. Por lo que según el total en puntos de las tres constelaciones se ve que el GALILEO tiene un

mayor peso en cuanto a las características ofrecidas, con un total de siete puntos.

### ELECCIÓN DEL NÚCLEO GNSS

Del párrafo anterior y la tabla VIII se concluye que la mejor elección para el núcleo del GNSS propuesto para la región de Centroamérica, específicamente en Guatemala es un sistema que:

- Principalmente funcione con el sistema de navegación global europeo Galileo.
- Pero como sistema con respaldo, se propone que éste funcione con ambos sistemas tanto Galileo como GPS.
- En caso de que el sistema GPS fuera gratis y el Galileo tuviera un precio, aún así el de iniciativa europea presta las mejores características para la implementación, como núcleo del GNSS en nuestro país.

Prosiguiendo con la elección del tipo de aumentación se continuará en los párrafos posteriores con el análisis basándonos en diferentes fuentes de información.

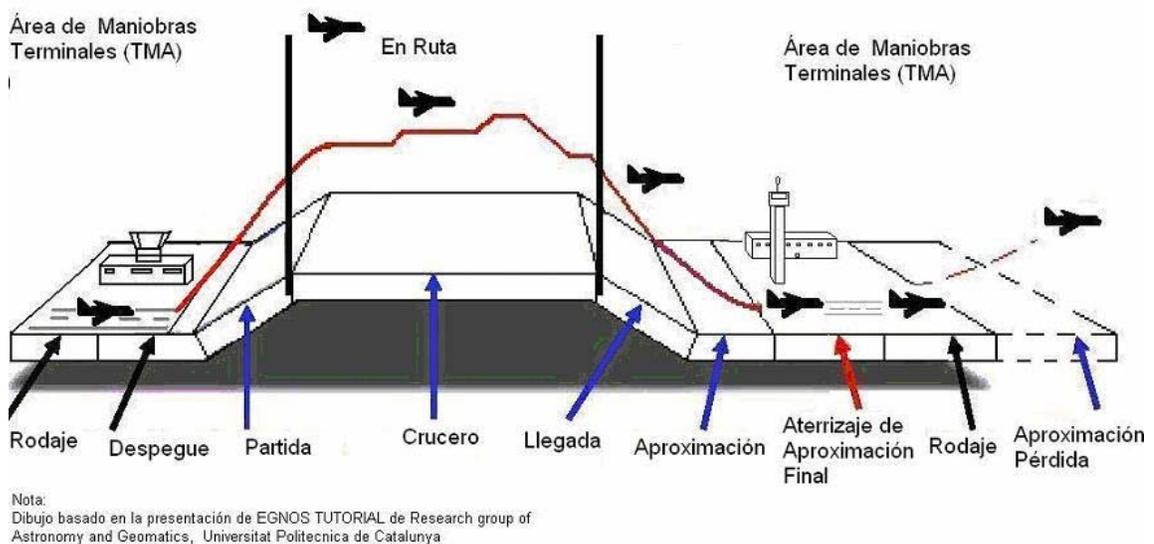
Cuando se formuló el plan de éste estudio se pensó que todos los sistemas de aumentación ofrecían las mismas características. Se concibió que todos los sistemas tenían la misma cobertura en servicio. Se tuvo la idea de que con elegir uno de ellos sería suficiente para poder reemplazar a todas las radioayudas terrestres actuales de la región correspondiente a Guatemala.

Sin embargo durante el desarrollo del capítulo anterior (Sistemas de aumentación de la señal GPS) y del presente hemos notado que los sistemas

de aumentación ofrecen diferentes beneficios y que su aplicación depende de la fase de vuelo que se quiere apoyar para la navegación aérea.

Las fases de vuelo son divisiones por secciones de las trayectorias que las naves aéreas recorren, desde el rodaje de partida hasta el rodaje de llegada de las mismas. En la Figura 4-2 se presentan las fases de vuelo.

**Figura 31. Fases de vuelo**



Fuente: Presentación *EGNOS TUTORIAL* de Research group of Astronomy and Geomatics Universitat Politècnica de Catalunya. <http://gage1.upc.es/>

El objetivo inicial de la propuesta de aumentación es elegir el sistema de aumentación más adecuado para la FIR centroamericana, porque Guatemala es parte de la misma. La forma más clara de observar las características principales de dichos sistemas es a través de una tabla comparativa. Por lo que se presenta la tabla IX como un resumen de los sistemas de aumentación.

### EXPLICACIÓN DE LA TABLA IX:

La tabla IX señala el potencial operacional de los sistemas de aumentación del GNSS. Se expone en ésta el potencial del ABAS, SBAS y GBAS para alcanzar los requerimientos tan exigentes que la navegación aérea requiere para una determinada fase de vuelo.

Se muestran los tres tipos de aumentación, desde el punto de vista genérico de la OACI. En esta tabla no se pretende mostrar cual de los sistemas específicos que se encuentran en desarrollo es más óptimo que los demás, solamente se hace mención de los sistemas genéricos y su grado de recomendación respecto a la fase de vuelo.

**Tabla IX. Nivel de servicio de los elementos de Aumentación del GNSS**

<b>Elemento de Aumentación</b>	<b>En ruta oceánica</b>	<b>En ruta continental</b>	<b>Terminal</b>	<b>Aterrizaje y Aproximación por instrumento</b>
Constelación satelital con ABAS	Ideal para la navegación cuando el sistema FDE esta disponible	Ideal para la navegación cuando el sistema RAIM esta en uso	Ideal para la navegación cuando el sistema RAIM esta en uso	Ideal para aterrizajes de no precisión cuando el sistema RAIM esta disponible y otra fuente de navegación esta en uso en un aeródromo alternativo

**Continuación Tabla IX. Nivel de servicio de los elementos de Aumentación del GNSS**

Constelación satelital con SBAS	Ideal para la navegación	Ideal para la navegación	Ideal para la navegación	Ideal para aterrizaje de no precisión y el aterrizaje de aproximación con guía vertical, dependiendo del rendimiento del SBAS.
Constelación satelital con GBAS	N/A	No recomendado por la OACI explícitamente	No recomendado por la OACI explícitamente	Ideal para aterrizaje de no precisión y de precisión Categoría I (Potencialmente para categoría II y III)

Fuente: Tabla basada en el manual del GNSS, capítulo 4 ( localizado en el [www.icao.int](http://www.icao.int) y buscar como “ gnss manual “ ), versión 1, ICAO.

El primer sistema o elemento de aumentación que es parte de la tabla es el ABAS. El ABAS es un sistema de aumentación basado en aeronave. En éste la misma aeronave posee sus propios medios para mejorar los requisitos,

de un sistema de navegación, a través de información disponible a bordo de la misma.

La técnica ABAS más común es llamada RAIM ( *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* ). El RAIM requiere que se puedan realizar mediciones de posicionamiento por satélite, de forma redundante, para detectar señales erróneas y alertar al piloto. Existen otras técnicas de ABAS y estas integran al GNSS con otro tipo sensores a bordo de la aeronave.

Lo que se debe resaltar en el sistema ABAS, es el grado de dependencia con los sistemas abordo de la aeronave. Es decir que para implementar este tipo de aumentación en la región, todas las aeronaves deberían estar equipadas con la aviónica necesaria, para hacer sus propias correcciones sobre el núcleo del GNSS.

Tradicionalmente el servicio de señales de localización o navegación, es prestado por equipos externos al aeronave, con éste tipo de aumentación las aeronaves estarían prácticamente operando en forma independiente sin ningún equipo en tierra como referencia. Por lo que no hay un mecanismo como medio de referencia.

El concepto de referencia aquí señalado, quiere decir que no hay ningún monitor externo que garantice que el sistema está operando correctamente. Sí el sistema llega a fallar, no hay un elemento supervisor externo, que certifique que éste funciona dentro de los parámetros normales. Es decir todo depende de los equipos instalados abordo.

Dentro de los objetivos generales de este trabajo, esta el proporcionar los lineamientos teóricos, para diseñar un sistema de

navegación basado en satélite confiable y seguro. Para el uso de naves aéreas en el espacio aéreo guatemalteco. Por lo que a nuestro país concierne aplica mayormente la fase de vuelo en ruta continental.

Cuando se examina el nivel de servicio de las diferentes fases de vuelo para la aumentación de tipo SBAS, se observa que es recomendada según la ICAO para:

- Las tres primeras de izquierda a derecha que aparecen en la tabla, es decir en ruta oceánica, en ruta continental y terminal.
- La de aproximación terminal, dependiendo del rendimiento del sistema SBAS.

De la tabla se ve que el tercer tipo GBAS es prácticamente recomendado para la fase de aproximación y aterrizaje por instrumento. Según las definiciones de los estándares y practicas recomendadas por la normativa internacional, el GBAS prestará soporte al servicio de posicionamiento en el área terminal.

#### ELECCIÓN DEL TIPO DE AUMENTACIÓN

Finalmente como conclusión se elige el sistema de aumentación de tipo SBAS por ser el que tiene un mayor potencial en la cobertura de la FIR centroamericana y por ende en Guatemala. Debido a que el tipo de aumentación que aplique para el GNSS en la región, tiene que ser el que mejores características tenga y aplique a las características de tráfico en el área.

#### **4.4.2 Ventajas y desventajas del tipo elegido**

##### **VENTAJA: LA COBERTURA**

Dentro de las ventajas del sistema elegido, es decir SBAS, se puede citar la cobertura. En el criterio de la cobertura se ve que es claramente este sistema, favorecido o recomendado por la OACI, en la Tabla IX. Porque existe solamente la restricción para la fase de aproximación con instrumento, que depende del rendimiento del sistema.

Sí se le compara respecto a la cobertura con el GBAS, éste último se queda muy atrás, porque este está proyectado para la fase de aterrizaje y aproximación por instrumento, entre 20 y 30 millas.

En un sistema SBAS la cobertura depende de las huellas de sus satélites geostacionarios asociados. Lo anterior se puede verificar en la Figura 16, que presenta las coberturas o huellas de cuatro satélites, que prácticamente cubrirían las comunicaciones satelitales en todo el mundo habitado.

Otro ejemplo de la enorme cobertura del sistema SBAS esta en la Figura 28, en donde se muestra la cobertura del sistema EGNOS. La cobertura general es la acción compuesta de tres satélites:

- Un satélite Inmarsat AOR-E (15.5 grados oeste)
- Un satélite Inmarsat IOR (65.5 grados este)
- Un satélite Artemis ( 21.5 este )

También se debe considerar que debido a la ubicación geográfica, que no es cerca de los polos, la latitud de Guatemala permite cobertura

con SBAS. Por lo que sí habría un buen nivel de recepción, dependiendo de la longitud en la que se encuentre el satélite geoestacionario utilizado.

#### DESVENTAJA: NO SOPORTAR TRAFICO MUY ALTO

El SBAS tiene la desventaja de no soportar demandas de tráfico muy altas, si se le compara con el GBAS. Porque el GBAS esta diseñado para manejar demandas muy altas de tráfico, por las que es justificada su implementación y disponibilidad (cuando ya existe).

A pesar de que la recomendación según la OACI, para la fase de aterrizaje y aproximación por instrumentos, se inclina mayormente para los sistemas GBAS, para nuestra región no es crítico este aspecto. Porque en Guatemala no se manejan los mismos volúmenes de tráfico aéreo, como lo son en Europa y Norteamérica.

Cuando se realizó el tercer capítulo, se ejemplifico el sistema LAAS como un sistema de tipo de aumentación GBAS. El LAAS es un sistema de los Estados Unidos que esta siendo implementado por la FAA, este ofrece una exactitud menor de un metro (según página [www.faa.gov](http://www.faa.gov)). Sin embargo con el sistema elegido para nuestra región, se tiene como constelación de satélites de navegación a Galileo, que ofrece prácticamente lo mismo, sin ningún sistema de aumentación (según página [www.esa.int](http://www.esa.int)).

Es decir que la desventaja de no soportar tráfico muy alto es relativa, y para nuestra aplicación no es determinante.

#### VENTAJA: VARIAS ESTACIONES DE REFERENCIA

Puesto que el tipo de aumentación SBAS utiliza una red de estaciones de referencia, esto asegura su confiabilidad. Porque con esta red se evita que exista dependencia en una sola estación, es decir es mejor confiar en un grupo de estaciones de referencia que en una sola, como es el caso del GBAS.

#### DESVENTAJA: Dependencia en los satélites geoestacionarios

En el sistema propuesto se tiene considerado que dependerá de los satélites geoestacionarios. Es decir que si por alguna razón, el correspondiente satélite geoestacionario de la región fallara, se tendría que tener un redundante para su respaldo. Por lo que sería una desventaja económica, para mantener el servicio en caso de falla.

#### **4.4.3 Diseño del sistema**

Una vez elegido el sistema de mejora de señales de navegación, que se utilizará para la propuesta de aumentación y las constelaciones que se proponen como núcleo del sistema, se llega al punto de partida del planteo del diseño.

El objetivo de éste punto es dar una panorámica de los factores asociados al diseño. La descripción global de cada uno de los componentes, se expondrá en el siguiente punto, partes del sistema, con diagrama a bloques de la propuesta.

Dentro del diseño existen varios temas o factores asociados que involucran la división del problema mayor, que en este caso es la planeación general del sistema. El diseño se divide en:

- Administración de los sistemas, que trata de determinar la organización o institución que estará a cargo de hacerlo posible y mantener.
- Hardware, es decir los equipos que se utilizarán, para llevar a cabo el objetivo de la propuesta.
- Software, son las tareas y procedimientos que los equipos deberán realizar.

Con este diseño no se pretende llegar a profundizar en él, como lo haría una industria especialista de este campo. No se puede tomar el lugar de una industria, que manufacturara o estuviera a cargo de la implementación del sistema, cuando esté estuviera en la fase de diseño y fabricación. Porque el potencial de una empresa de ese tipo es enorme, considerando sus recursos, como sus clientes y proveedores.

Con éste se pretende proporcionar los lineamientos teóricos, para proponer que este sistema de navegación aérea basado en satélite sea confiable y seguro para el uso de tráfico aéreo en Guatemala. Lo anterior basado en la normativa internacional que mayormente es proporcionada por la OACI.

## ADMINISTRACIÓN

Dentro del diseño del sistema, se intenta responder a la pregunta: ¿Es posible implementar un sistema de navegación aérea, basado en satélite, en Guatemala? Para lo cual se va a subdividir el problema o

pregunta inicial en las siguientes: ¿Quién lo implementará? ¿Cómo lo implementará? ¿En dónde se implementará?

Para responder a la pregunta: ¿Quién lo implementará?, se expondrá lo siguiente para demostrar la opción que mejor corresponde, para la planificación y realización del sistema.

A finales del año 1959, se celebró una conferencia de directores de aviación civil de Centroamérica, en Guatemala. El resultado de esto último fue la recomendación de establecer una corporación intergubernamental centroamericana de comunicaciones aeronáuticas.

Posteriormente el gobierno de la república de Honduras convocó una conferencia al respecto, en 1960. En la cual asistieron representantes centroamericanos. El resultado de esta fue la suscripción del convenio constitutivo de COCESNA ( [www.cocesna.org](http://www.cocesna.org) ). Luego este convenio fue ratificado por los respectivos órganos legislativos, de cada uno de los países que firmaron.

Dentro de los países miembros de COCESNA se tiene a: Belice, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. COCESNA es la corporación centroamericana de servicios de navegación aérea. Es un organismo internacional de integración centroamericana, creado por los estados miembros, para dar cumplimiento a sus compromisos y obligaciones, contraídos con el convenio de aviación civil internacional, celebrado en los Estados Unidos en 1944.

El artículo segundo del convenio constitutivo establece los derechos de COCESNA en la prestación de sus servicios en la región, que son:

- Servicios de tránsito aéreo
- Telecomunicaciones aeronáuticas
- Radioayudas para la navegación

Dentro de otras atribuciones que tiene COCESNA, se tiene: Fomentar y coordinar estudios relativos a los servicios e instalaciones de navegación aérea, considerando la evolución de la tecnología.

Así mismo se debe considerar que ante la OACI, existe un grupo que se llama Grepecas. Este último es la coordinadora para la planificación e implementación de los sistemas de aumentación GNSS, en las regiones del Caribe y Suramérica, dentro de los cuales esta incluida COCESNA.

CONCLUSION: ¿Quién lo implementará?

Según lo anterior y por la experiencia de la corporación COCESNA, es idónea para la implementación del sistema global de navegación por satélite en la FIR centroamericana, y por ende en Guatemala. Con el objeto de la optimización de recursos, tanto de usuarios como de los sistemas de apoyo a la navegación.

HARDWARE

Para responder a la pregunta: ¿Cómo se realizará el sistema de aumentación? Se subdivide la solución del problema o pregunta en dos, es decir hardware y software.

El hardware lo conforman los equipos, que se utilizan para dar una solución lo más apegada a la realidad. Dentro de estos podemos mencionar los siguientes:

- Estaciones de referencia
- Enlaces satelitales de subida
- Estación central de procesamiento
- Red de comunicación WAN
- Satélite geoestacionario
- Receptores abordo de aeronaves
- Sistemas auxiliares

Para responder a la pregunta: ¿Cómo se realizará el sistema de aumentación? Se subdivide la solución del problema o respuesta en dos, es decir hardware y software. A continuación se presentan las generalidades de cada uno de los componentes:

#### Estaciones de Referencia

Las estaciones de referencia son las que reciben la señal de los satélites de navegación, que en nuestro caso serán GPS y Galileo. Estas instalaciones son prácticamente para monitorear la señal de navegación, para que luego sea enviada a la estación central de procesamiento que corregirá la señal.

Para el diseño se sugiere que sean por lo menos dos instalaciones de referencia. Porque según las conclusiones de un estudio y demostración del sistema EGNOS en Centroamérica, con menos de cinco estaciones de referencia se trabaja en modo degradado.

El estudio y demostración al que se refiere el párrafo anterior fue acordado entre la OACI y tres estados participantes, de las regiones del caribe y Suramérica. Ellos fueron Colombia, Cuba y COCESNA. El nombre del proyecto fue EDISA, de sus siglas en inglés de demostración del sistema EGNOS en Suramérica.

El objetivo principal de tal proyecto fue probar que la tecnología europea, en cuanto a la navegación por satélite, es funcional y adecuada para ser utilizada en las regiones del Caribe y Suramérica, lo que incluye a Guatemala.

Pero las conclusiones de este proyecto, indicaron que los resultados no fueron óptimos, debido a la baja visibilidad del satélite geoestacionario utilizado. Es decir que hubo pérdida de mensajes de satélite geoestacionario, por poca visibilidad.

Por lo que se propone una en el aeropuerto internacional La Aurora y la otra en cerro Niktún, San Andrés Petén. Debido a que según el análisis de la administración del sistema, corresponde la administración a la corporación centroamericana de servicios de navegación aérea y que esta posee estaciones de comunicaciones en estas posiciones.

Las coordenadas de los sitios son las siguientes:

- Estación La Aurora: 14 ° 35´ 10.7´´ Norte  
90 ° 31´ 54.6´´ Oeste  
Altitud 1500 m sobre nivel del mar

- Estación Cerro Niktún: 16 ° 57' 57.28'' Norte  
89 ° 55' 42'' Oeste  
Altitud 270 m sobre nivel del mar

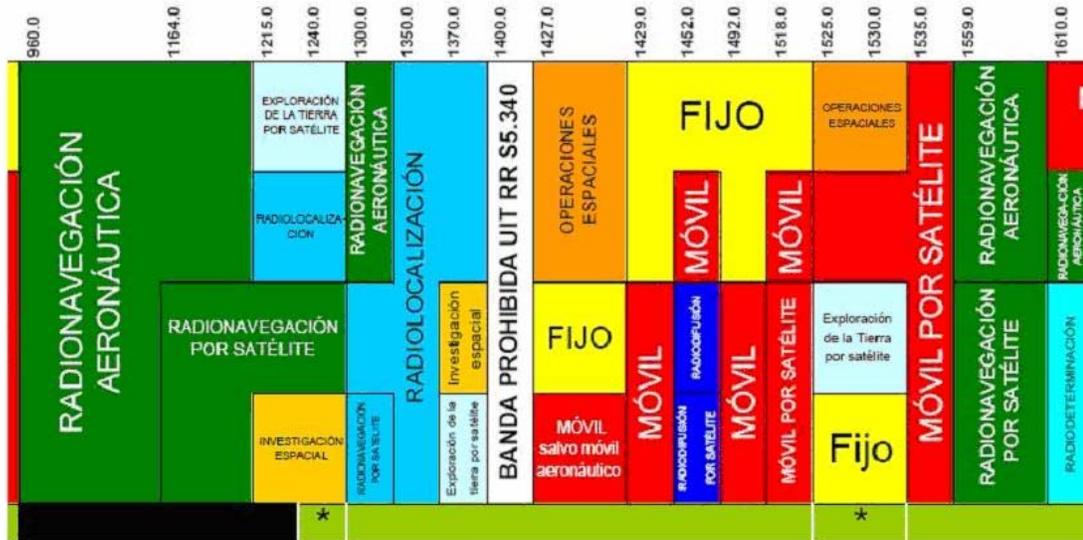
Asimismo se investigó acerca de la administración del espectro radioeléctrico, en el país. Esto se realizó como procedimiento de verificación que sí cumple con la normativa interna de nuestro país. Las leyes referentes a las comunicaciones electrónicas son administradas por la superintendencia de telecomunicaciones de Guatemala ( [www.sit.gov.gt](http://www.sit.gov.gt) ).

Según la superintendencia de telecomunicaciones de Guatemala, el espectro radioeléctrico esta administrado para la radionavegación por satélite y la radionavegación aeronáutica, y esta referido en la normativa por la UIT (Unión internacional de telecomunicaciones, [www.itu.int](http://www.itu.int) ). La banda UHF esta comprendida desde 300MHz a 3GHz, dentro de la cual se encuentran los siguientes rangos de frecuencias:

- 960MHz - 1340MHz, la cual una parte es banda de frecuencia reservadas y la otra banda de frecuencias reguladas.
- 1550MHz - 1600MHz, lo que corresponde a banda de frecuencias reguladas

En la siguiente figura aparece el segmento de la banda UHF del espectro radioeléctrico, que es de interés para la utilización del sistema:

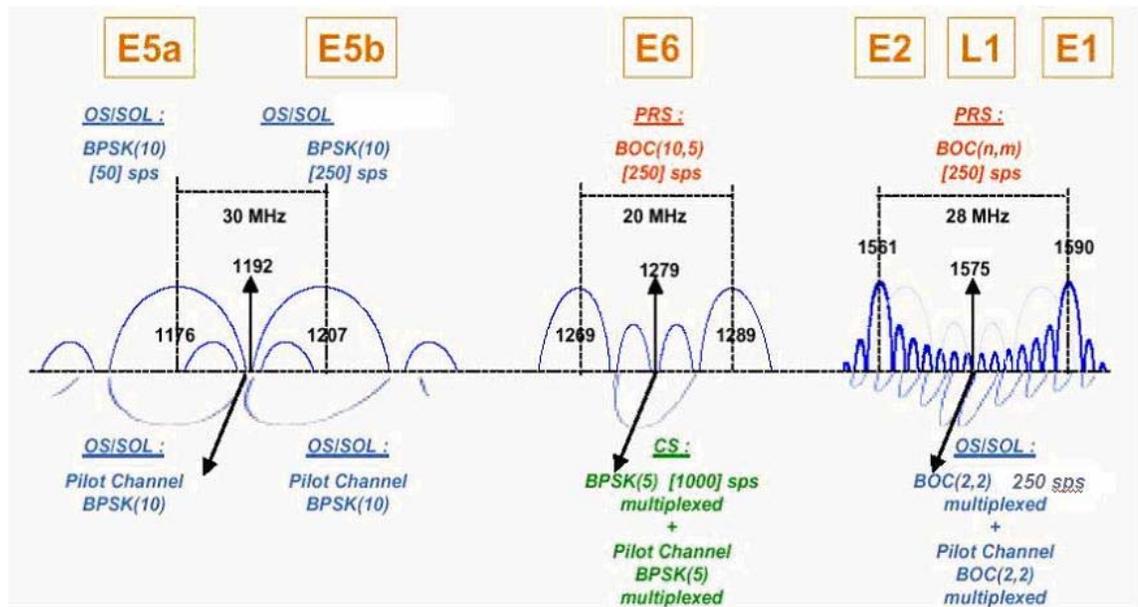
Figura 32. Segmento de espectro radioelctrico de UHF



Por lo que se pueden utilizar, los siguientes sistemas:

- GPS, L1 y L2. Para la primera aparece dentro de la banda de frecuencia reguladas, y L2 dentro de la banda de frecuencias reservadas. Por lo que para utilizar la primera frecuencia se necesita solicitar a la SIT.
- Según la tecnología Galileo, ver la figura 4-4, presenta esta distribución espectral de señales. Estas señales proporcionarán diferentes servicios como lo es el servicio abierto (OS), el servicio comercial (CS), el servicio seguridad de vida (SOL) y los servicios públicos regulados (PRS).

Figura 33. Estructura de la señal de Galileo



Fuente: Página [www.esa.int](http://www.esa.int)

### Estación de Control y Procesado

La estación de control y procesado, tendrá la función de adquirir la información proveniente de las estaciones de referencia. A partir de ésta información se elaboran los mensajes de corrección de señales de navegación.

Luego de elaborados los mensajes de corrección se transmiten hacia el satélite geostacionario. Éste último a su vez tendrá la misión de enviar la señal de navegación ya aumentada a la región de cobertura del mismo.

La ubicación de la estación de control y procesado, es la misma en la estación La Aurora, con las siguientes coordenadas:

- Estación La Aurora:      14 ° 35´ 10.7´´ Norte  
                                  90 ° 31´ 54.6´´ Oeste  
                                  Altitud 1500 m, sobre nivel del mar

Las funciones principales de la estación de control y procesado son:

- Monitoreo y control de la señal aumentada. Es decir, aquí se efectúa la corrección de la señal de navegación, como se hace en un sistema de control o regulación.
- Se encarga de almacenar información, y de guardar sus correspondientes archivos. Estos archivos son posteriormente utilizados para el tratamiento estadístico, para obtener los indicadores de exactitud, integridad, continuidad y disponibilidad.
- Mide la calidad del sistema aumentado.
- Provee los mensajes de corrección.
- Asegura la integridad de los usuarios del sistema.

Red de comunicación WAN y satélite geoestacionario

Para la comunicación entre las estaciones de referencia y la de procesamiento y control es necesario, poseer en el sistema una red de área amplia, es decir una WAN ( de sus siglas en inglés Wide Area Network ). Por medio de la WAN se transfiere información obtenida de las estaciones de referencia a la estación de monitoreo y control. Luego se transfiere la información de la señal ya aumentada hacia la estación del enlace satelital.

Los enlaces de la red WAN, se pueden efectuar por medio de fibra óptica, de radio a microonda o bien con enlaces de comunicación vía satélite. Hasta este punto, corresponde decidir que tipo de medio o tecnología se usa para dicho propósito.

Sí la tecnología de fibra óptica es utilizada, entonces se hace un tendido de cable de fibra desde la estación de cerro Niktún, San Andrés Petén, hacia el aeropuerto internacional La Aurora. Además del tendido, deben existir estaciones de repetidoras.

Por lo que se puede considerar que esta opción representa:

- Una inversión inicial de muy alto costo.
- Mantenimiento sobre todo el tramo del enlace, tanto en la fibra como en las estaciones de repetidoras.

Al considerar la siguiente opción, la de radiomicroondas, existen inconvenientes similares, respecto a la inversión inicial como al mantenimiento a las estaciones repetidoras.

Las opciones anteriores presentan desventajas considerables. La última opción es la de enlace vía satélite, que se cuenta en los sitios de las estaciones de referencia. Sin embargo se tiene que hacer ciertas modificaciones en ambas estaciones para poder adaptarlas a la necesidad del sistema.

Puesto que en las estaciones actuales, se cuenta con enlaces satelitales; se debe utilizar la misma infraestructura y equipo existente. El satélite que usan las estaciones actuales en COCESNA es el INTELSAT 805 a 305.4 ° E (Geoestacionario)

### Sistemas auxiliares

El diseño en general del sistema de aumentación, puede funcionar sin éstos sistemas auxiliares, pero es muy recomendable que éstos sean implementados para un mejor rendimiento de los sistemas de referencia de navegación aérea.

Uno de los sistemas auxiliares que no es complejo, pero no deja de tener importancia, son los sistemas de aire acondicionado, los cuales mantienen una temperatura ambiente para la correcta operación de los sistemas, en el lugar donde se instalan los equipos internos; tiene la ventaja de prolongar la vida útil de los sistemas.

Cuidar de la temperatura en equipos, ya sea a microprocesadores o de cualquier otra tecnología a semiconductores, brinda la oportunidad de poseer equipos estables. Lo que se debe incluir en éstos es la redundancia de aires acondicionados, debido a que sí uno falla, actúa el de respaldo y viceversa.

Otros sistemas que son de importancia, son los de protección eléctrica. Entre sus componentes se tiene un pararrayos, localizado a por lo menos dos metros arriba de la altura más alta (torres y antenas) de lo que se intenta proteger. Además provee la protección humana en las instalaciones del edificio.

Luego de tener un dispositivo de captura de la descarga atmosférica, es necesario orientar la descarga hacia la tierra, eficientemente, por medio de un conductor plano, un cincho de cobre estañado, el cual es de baja impedancia inductiva.

Este conductor tiene esa forma porque se ha demostrado que la inductancia en los conductores de bajada, juega un papel crucial de la componente inductiva de la impedancia. Un conductor plano tiene menor inductancia que uno de múltiples hilos y convencional.

Después del conductor de bajada, se aterriza al sistema de disipación de descargas, con varillas de cobre. El sistema de disipación se conecta a una red de tierras que, en un punto único del sistema de puesta a tierra, debe tener una resistividad de 5 ohms o menor.

Otros componentes que son de protección eléctrica son los supresores de transientes. Se debe conectar uno a la acometida principal de 200 kA y a los equipos de 10kA, para los voltajes de alimentación correspondientes, debido a la localización de las instalaciones, principalmente en el cerro Niktún, Petén.

## SOFTWARE

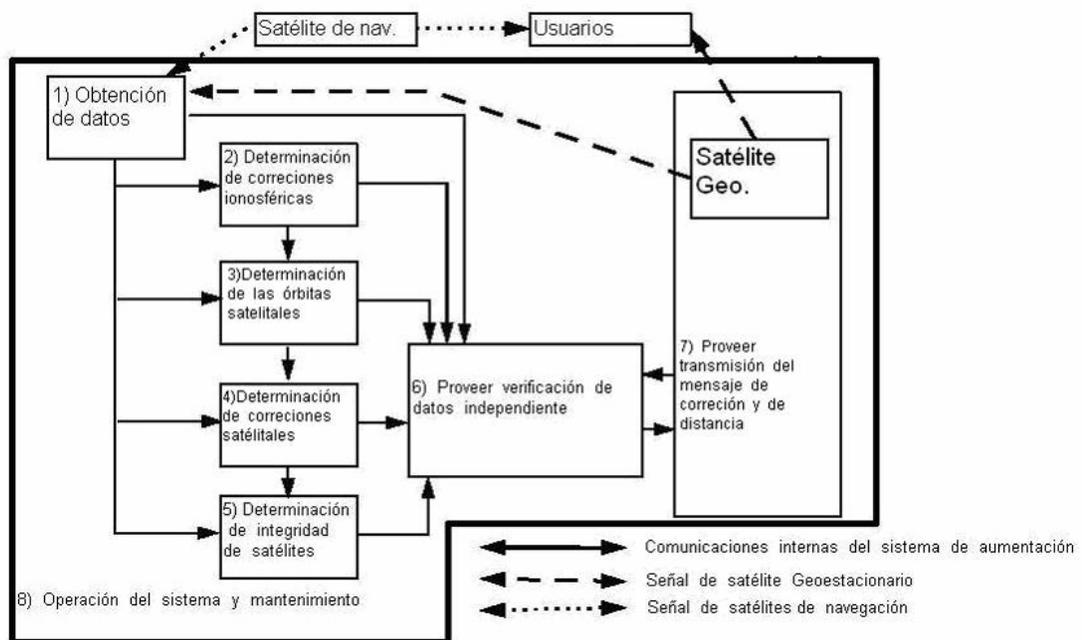
En este apartado se expondrá en forma general, los procedimientos, para hacer posible el sistema de aumentación. El tratamiento de las señales y la relación funcional se explicará paso a paso.

El proceso general de poder obtener la información de los satélites de navegación, aumentarla y entregarla a los usuarios, se ilustra en la figura 34. El proceso total se subdivide en 8 funciones. Todas las funciones representan una cadena, sí alguno o algunos de sus eslabones llegara a fallar, el proceso total falla.

Para desarrollar este tema se utilizó como apoyo el documento *Wide Area Augmentation System (WAAS)* de la FAA. Cada una de las funciones se subdivide en:

- Señales o datos de entrada, que son las variables de entrada de la función.
- Procesamiento, que es la explicación de la función en mención.
- Señales o datos de salida, que son los resultados de la función.

**Figura 34. Relaciones funcionales del sistema de navegación aérea basado en satélite**



Fuente: Documento WAAS de la FAA, página [www.faa.gov](http://www.faa.gov) .

#### Función 1: Obtención de datos

Esta función recibe señales de información o datos de todos los satélites, para proporcionar el servicio de navegación, es decir se obtienen

los datos de los satélites de navegación y geostacionarios, así como la información troposférica.

Sus entradas son las señales provenientes de los satélites de navegación y geostacionarios, así como la información troposférica e información de la localización del equipo.

El procesamiento debe incluir la medición de la pseudodistancia (ver glosario), e información de navegación de los satélites del núcleo GNSS. Se debe recibir la misma información que los usuarios reciben de los satélites geostacionarios que soportan el servicio, además se debe obtener y usar el error troposférico para reducir al mínimo errores en los resultados de ésta función.

Las salidas que provee ésta función son: Mediciones de pseudodistancia, información de navegación de satélites del núcleo GNSS, información de la pseudodistancia provista por satélite geostacionario, datos de navegación de satélite geostacionario.

#### Función 2: Determinación de correcciones ionosféricas

Para determinar las correcciones ionosféricas, se reciben los resultados de la primera función, es decir las mediciones de pseudodistancia, para luego determinar las correcciones debidas al retardo ionosférico.

Dentro de la información de entrada se tienen los datos diferenciales, que en el caso del GPS, esta basada en las dos frecuencias L1 y L2, además las señales de Galileo. Se tiene la

información de los satélites de navegación y la definición de los puntos ionosféricos IGP's.

El proceso debe incluir las estimaciones del retardo vertical en cada uno de los puntos definidos IGP's. Se debe calcular el GIVE para cada uno de los puntos definidos geográficamente y determinación de los IGP's que no cuentan con información suficiente para calcular los correspondientes retrasos.

Las salidas de ésta función son: Posiciones de los IGP's, estimados de los retardos verticales y la información de los errores de los retardos ionosféricos en un IGP específico.

### Función 3: Determinación de las órbitas satelitales

Esta función debe recibir información de los satélites de navegación y geoestacionarios, para determinar la posición, velocidad, corrimiento de reloj y deslizamiento del satélite.

Las entradas deben contener la siguiente información: Seudodistancia de satélite de navegación, datos del satélite de navegación y del geoestacionario y troposférica.

El proceso debe incluir: Minimización de los efectos troposféricos e ionosféricos, antes de determinar la información de navegación de los satélites geoestacionarios y de navegación. Determinación de la órbita de satélite de navegación, es decir posición, velocidad, corrimiento de reloj y deslizamiento de satélite respecto a la red en tierra y segmento de control del sistema de aumentación.

Se debe determinar los parámetros de la órbita geoestacionaria, es decir: posición, velocidad, aceleración y corrimiento de reloj respecto al sistema de aumentación, como también calcular la información de efemérides del satélite geoestacionario.

Los resultados de la función son: Información orbital de los satélites geoestacionarios y de navegación, datos de efemérides del satélite geoestacionario.

#### Función 4: Determinación de las correcciones satelitales

Para determinar las correcciones satelitales, esta función debe recibir información de navegación y órbita de todos los satélites a la vista, que ejecuten la función de navegación, incluyendo los de navegación y geoestacionarios para determinar las correcciones exactas en cuanto al reloj y errores de efemérides.

La información de entrada debe incluir: Mediciones de pseudodistancia de satélites de navegación y mediciones diferenciales, pseudodistancia de los geoestacionarios y datos de órbita para ambos tipos de satélites.

El proceso que tiene que ejecutar esta función es: Minimización de efectos ionosféricos y troposféricos, es decir se deben minimizar estos efectos en las pseudodistancias de los satélites antes de determinar las correcciones para que la exactitud del sistema sea alcanzada.

Se deben corregir los errores a largo plazo del satélite, que incluyen los errores de reloj y efemérides. Así como: Cálculo del error

de la distancia diferencial del usuario UDRE, cálculo del factor de degradación de corrección inmediata.

Las salidas de esta función son: Correcciones de largo plazo e inmediatas, UDRE's, factor de degradación para correcciones inmediatas, etc.

#### Función 5: Determinación de integridad de satélites

Para poder determinar la integridad de la corrección ionosférica y de satélite, esta función debe recibir señales de información de navegación de todos los satélites que ejecutan la función de navegación, incluyendo los de navegación como los geoestacionarios. Todo esto para proveer mensajes de advertencia por satélites fallados, o que la corrección ionosférica está fuera de los límites, y dichas señales no deben ser usados para la navegación.

Las entradas incluyen información de navegación de ambos tipos de satélites (navegación y geoestacionarios), correcciones a largo plazo e inmediatas, localizaciones de los IGP's, estimados de los retardos ionosféricos verticales, datos del GIVE Y UDRE, indicador de degradación de parámetros, factor de degradación de correcciones inmediatas, etc.

El proceso debe generar información, de no usarse para cualquier satélite cuyos errores de pseudodistancia no estén dentro de los límites de la estructura de mensaje de aumentación, así como para cualquier satélite cuyos: UDREs, corrección de retardo ionosférico, GIVE exceda los límites de la estructura de mensaje de aumentación.

Se debe determinar la visibilidad de los satélites que están a la vista, basados en los almanaques de ambos tipos de satélites. Se debe además generar un mensaje de ausencia de monitoreo para cualquier satélite que no esta siendo supervisado por el sistema de aumentación.

Las salidas del sistema incluyen: La generación de mensajes de no utilizar un cierto satélite o de ausencia de monitoreo, y la lista de satélites que deberían estar a la vista pero que sus señales no están siendo recibidas.

#### Función 6: Verificación de los datos independiente

Esta función debe independientemente verificar la integridad de todos los datos provistos por el sistema de aumentación, antes de la transmisión y validación. Como se puede ver de la figura 34 ésta función se alimenta de todas las salidas de las funciones anteriores y de la siguiente función por lo que su complejidad va mucho más allá del objetivo de este trabajo.

#### Función 7: Transmisión del mensaje de corrección y de distancia

Para proveer la transmisión del mensaje de aumentación, ésta función debe proporcionar:

- Una emulación de la fuente de medición de localización, por satélites de navegación.
- Información de integridad
- E información de corrección para los usuarios del sistema de aumentación.

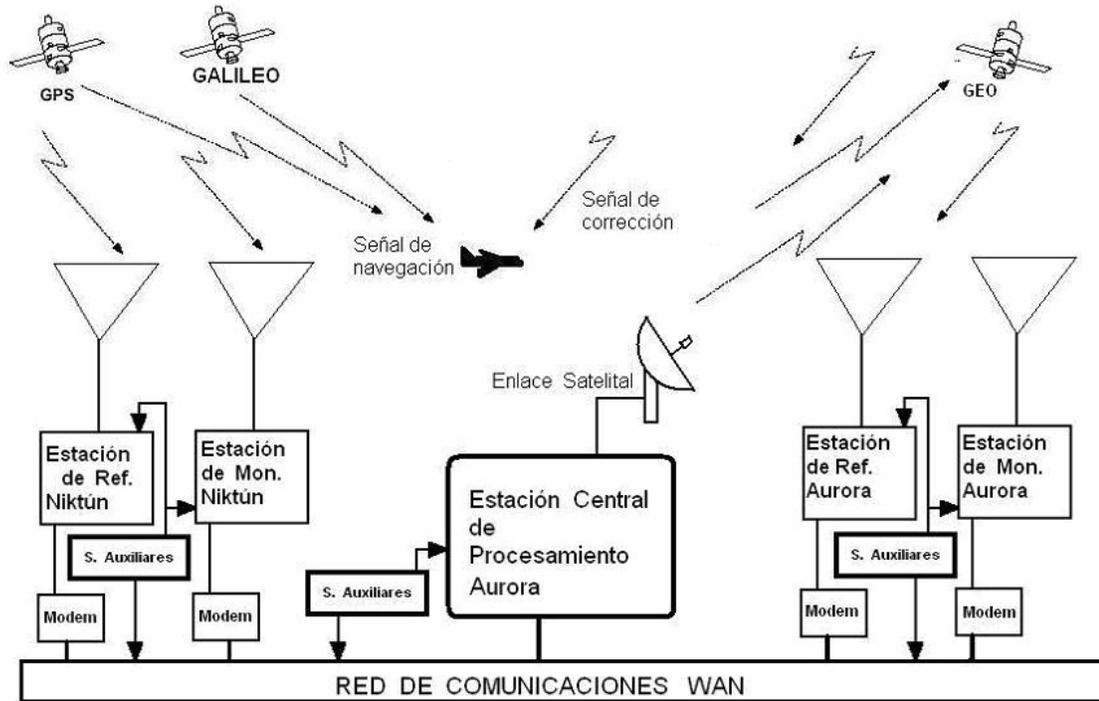
#### Función 8: Operación del sistema y mantenimiento

Con esta función se realiza las tareas de monitoreo y control, es decir que cada uno de los componentes del sistema tiene que estar conectado a un canal de supervisión y control. Si alguno de los equipos falla se debe de poder diagnosticar ¿dónde esta el origen del problema? Los parámetros de todos los equipos se pueden monitorear y controlar desde una consola, terminal de computadora para una mejor operación del sistema.

#### **4.4.4 Partes del sistema**

Lo que corresponde en este punto es identificar cada una de las partes del sistema de aumentación, y asociarlas con sus respectivas funciones, descritas en el diseño del software. Por lo que se presentan los equipos a utilizar, en forma de diagrama a bloques, para tener una mejor comprensión global del sistema. En la figura 35 se muestra la arquitectura del sistema total.

**Figura 35. Sistema de aumentación a bloques**



Aquí conviene recapitular lo mencionado en el diseño del sistema. Por lo que en lo siguiente se explica en forma resumida el resultado que este estudio ofrece.

Las estaciones de referencia de Niktún y la Aurora, recogen la información de navegación proveniente del núcleo del GNSS, que en nuestro caso son las constelaciones GPS y GALILEO. La función uno del diseño del software es realizada por medio de estas estaciones. La antena captura la señal de radiofrecuencia y la decodifica para obtener los datos que indican cual es la localización de la estación de referencia.

Cabe mencionar que en la figura solamente aparece un satélite GPS y uno Galileo, pero estos representan a las constelaciones de satélites completas, es decir el núcleo del GNSS. En donde el GPS es

un sistema ya implementado (de los Estados Unidos) y el Galileo (de iniciativa europea) en proceso de desarrollo.

Luego de obtenidos los datos de localización, por las estaciones de referencia, éstas se conectan por medio de una red de comunicaciones de área amplia, la que a su vez transfiere la información (no la procesan), a la estación de procesamiento central.

La estación de procesamiento central se encarga de determinar: Las correcciones ionosféricas, los estados de las órbitas satelitales, las correcciones satelitales (reloj y efemérides) y la integridad de satélites. Es decir realiza las funciones desde la función dos a la cinco (ver figura 34). A partir de la información anterior se hace una verificación independiente de los datos.

La función seis (ver figura 34) es realizada por medio de las estaciones de monitoreo, que deben generar los mismos datos que las de referencia. Por lo que la estación de procesamiento central debe comparar los datos provenientes de ambos tipos de estaciones y verificar si existe algún grado de desacuerdo entre estas. Cuando no existe ningún desacuerdo se puede producir el mensaje de corrección.

Cuando los mensajes de corrección están listos, se envían por medio del enlace satelital al satélite geoestacionario, aquí se realiza la función siete para ser repetidos en la región.

El satélite geoestacionario entrega el producto final a los usuarios y a las estaciones de referencia, para cerrar el sistema de control.

El bloque de los sistemas auxiliares aparece interconectado con el resto, porque es necesario mantener una temperatura controlada (climatizada) y protegida contra las descargas atmosféricas de cualquier índole.

La red de comunicaciones WAN, se encarga del transporte de datos provenientes de las estaciones de referencia y monitoreo hacia la estación de procesamiento central, ubicada en El Aeropuerto Internacional La Aurora. Los enlaces deben estar calculados para permitir comunicación a 64 kbps.

El diseño del sistema en general termina hasta aquí. No se pueden dar mayores especificaciones de los equipos porque no se cuenta con ellos; sin embargo con éste aporte se puede tomar como punto de partida, para el diseño general y poder luego iniciar una implementación real. Dicha realización debe ser por medio de la contratación de una empresa experta en este tipo de soluciones, como se ha hecho en Europa y Estados Unidos.

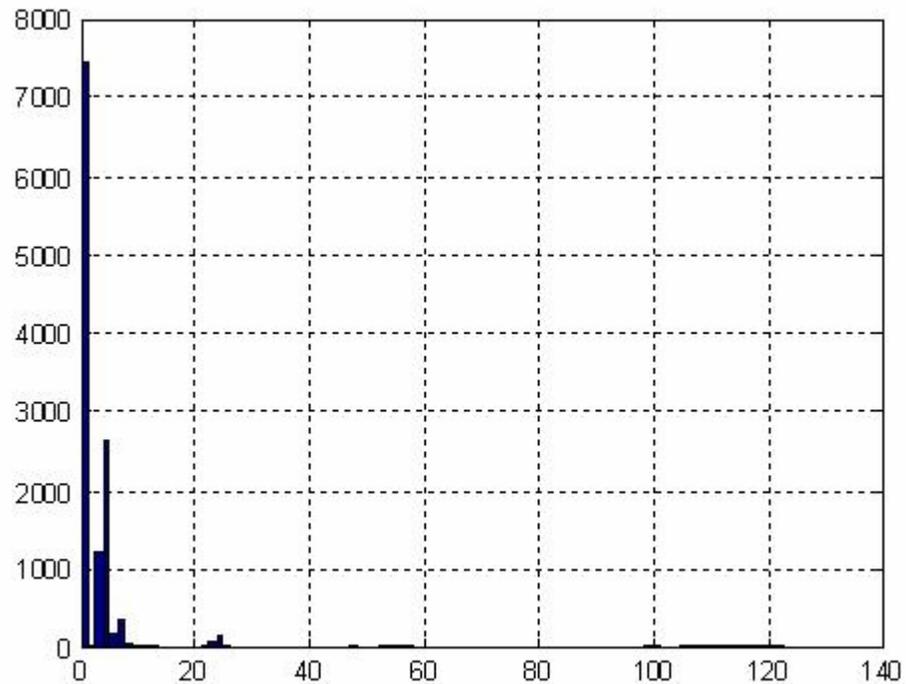
#### **4.4.5 Mediciones esperadas para la puesta en marcha**

Para la puesta en marcha del sistema será necesario obtener una demostración, verificando que el sistema cumple con los estrictos requerimientos que la aviación civil necesita, para mantener un alto grado de seguridad, para los usuarios.

Esta demostración será por medio de mediciones hechas en indicadores de los requerimientos, del rendimiento que el sistema debe

proveer. Por ejemplo en la figura 36 se presenta un histograma del error de la posición horizontal.

**Figura 36. Ejemplo del histograma del error de la posición horizontal**



Es decir para un sistema ideal; la diferencia entre la posición real de una estación de referencia y la posición estimada o provista por el sistema, para la misma estación, debe ser nula, en todo tiempo. Sin embargo como éste es un sistema real, ésta diferencia o error no siempre es cero.

En el histograma se observa que gran parte de las estimaciones de posición horizontal, concuerdan con un error nulo. De ésta manera se concluye que los indicadores de los resultados del rendimiento del

sistema, tienen que llevar un tratamiento estadístico, para evaluarse de una mejor manera.

Como se indicó anteriormente, el sistema debe realizar la función número 8 por medio de un monitoreo y control. A través de éste último será posible obtener el tratamiento estadístico de los indicadores del rendimiento del sistema.

#### **4.4.6 Comparación de costos de las instalaciones basadas en satélite y los basados en sistemas convencionales**

Para poder obtener una comparación real de costos entre los dos sistemas, se debe tener información práctica de ambos. Sin embargo como el nuevo sistema aún está en fase de planificación, solamente se puede hablar de las consideraciones que afectan el costo de la inversión y mantenimiento del mismo.

Como se estudia en el capítulo 1, la cobertura de los sistemas actuales de ayuda para la radionavegación fue una de las principales desventajas. Sin embargo aquí se presenta una comparación entre los costos de los sistemas actuales y los costos potenciales de los basados en satélite.

Para dar apoyo a la navegación aérea en Guatemala existen varias radioayudas VOR/DME entre otras, que son administradas por la corporación de servicios de navegación aérea (COCESNA), las cuales son:

- CVOR/DME de Puerto San José
- DVOR/DME Rabinal

- DVOR/DME Puerto Barrios
- DVOR/DME Petén
- NDB La Aurora

Los administrados por la dirección general de aeronáutica civil (DGAC) de Guatemala son:

- DVOR/DME Aeropuerto La Aurora
- ILS Aeropuerto La Aurora

Si se parte del análisis de la comparación de costos, en relación a las radioayudas anteriores, se obtiene la siguiente tabla X.

**Tabla X. Estimación de costos de inversión inicial en sistemas actuales y basados en satélite**

Costo inicial sistemas convencionales (radioayudas)	Costo inicial sistemas basados en satélite
US\$ 2,500,000	US\$ 1,500,000

En el costo de los sistemas basados por satélite, se estima que esta inversión incluye las estaciones remotas y de referencia, así como la de procesamiento central, que son en su mayoría los equipos nuevos a adquirir.

Para presentar la tabla anterior se utilizó información real de la radioayuda DVOR/DME instalada en Puerto Barrios. Pero para asignar un valor a las estaciones de referencia/monitoreo y procesamiento central

solamente se presenta un estimado, porque no contamos con la información real de los fabricantes.

Los que cuentan con información del costo de los nuevos sistemas son los clientes/contactos que mantienen comunicación directa con los fabricantes, es decir los funcionarios de alto rango, de las organizaciones a cargo de la implementación de la nueva tecnología.

Otro factor que es de importancia, es el costo por mantenimiento. Como todos los mantenimientos que se realicen involucran el monitoreo de parámetros, aquí se presentará un ahorro sustancial; debido al mantenimiento preventivo o correctivo siempre requiere de la interacción humana, de ésta manera se reducen las comisiones a los sitios remotos como sucede con los sistemas convencionales.

Para los sistemas convencionales existen comisiones, de por lo menos una vez al mes, a cuatro lugares por radioayudas. En el caso de los nuevos sistemas se podría implementar la solución que el personal técnico resida en el sitio de Petén, y así evitar el costo de viáticos y boletos aéreos al lugar, ahorrando costos por viajes.

Otro factor que puede reducir costos es el hecho que la tecnología en los nuevos sistemas es mayormente digital. En las radioayudas convencionales los instrumentos de medición son en su mayoría analógicos, los cuales representan un alto costo en equipo.

Entre los instrumentos utilizados actualmente tenemos los PIR (receptor de señales VOR), medidores de potencia y voltímetros vectoriales, entre otros, que son de alto costo. Para los nuevos sistemas

en su mayoría se tendrían medidores de parámetros digitales, porque desde la salida de la primera función (obtención de datos), se tiene información digital, los cuales están incluidos dentro de la función de monitoreo y control.



## CONCLUSIONES

1. Debido al plan de navegación aérea mundial, la migración de los sistemas actuales a los basados en satélite, es un requisito que todos los estados reconocidos por la OACI, deben implementar en sus correspondientes FIR.
2. El propósito de implementar la navegación aérea basada en satélite, es obtener una mayor eficiencia, tanto para las organizaciones que tienen a su cargo la administración del espacio aéreo, como para los usuarios.
3. Se han dado a conocer los diferentes sistemas de aumentación y se encontró que el elemento de aumentación que tiene una mayor cobertura es la aumentación basada en satélite (SBAS).
4. Los lineamientos teóricos en los que se basa el diseño de la radionavegación del futuro, están fundamentados en los documentos generados por la OACI.
5. El diseño de la navegación aérea por satélite debe estar basada en la reglamentación de la OACI, para que se cumpla y sea reconocida internacionalmente.



## RECOMENDACIONES

1. Se sugiere a las organizaciones encargadas en la administración del espacio aéreo, en Guatemala, es decir a COCESNA y a la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), no invertir más en radioayudas convencionales, y optar por empezar el proceso evolutivo al GNSS.
2. Capacitar a su personal en cuanto al advenimiento de la nueva tecnología.
3. Empezar a cotizar el costo de la implementación de los sistemas GNSS con las empresas especialistas, preferiblemente con las que han trabajado con el proyecto EGNOS europeo.
4. No se sugiere remover todas las radioayudas a la navegación, aún cuando el sistema nuevo funcione con el rendimiento adecuado.
5. El plan de transición al nuevo sistema propuesto es el siguiente:

**Tabla XI. Recomendación de Transición al nuevo sistema en Guatemala**

<b>Pasos a seguir a partir del presente año</b>		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>1</b>	Cotizar con diferentes empresas, el costo de un proyecto que contenga dos estaciones de referencia y una de procesamiento central. Inquiriendo también en la recomendación dada por las empresas fabricantes y especialistas en la rama del GNSS.	<b>X</b>									
<b>2</b>	Revisión, evaluación y elección de la opción ganadora, que cumpla con todos los requisitos de un sistema para ser certificado internacionalmente. Firmar un contrato con la empresa adjudicada.		<b>X</b>								
<b>3</b>	Instalación de una estación de referencia en La Aurora y la estación de procesamiento central, con sus pruebas de validación y certificación.			<b>X</b>							
<b>4</b>	Período de prueba para una sola estación de referencia y de procesamiento central.				<b>X</b>						
<b>5</b>	No invertir más en instalaciones de radioayudas convencionales.					<b>X</b>					
<b>6</b>	Instalación de estación de referencia ubicada en sitio de Niktún Petén.						<b>X</b>				
<b>7</b>	Período de prueba para estación de referencia instalada en Niktún Petén, en conjunto con la estación de referencia y procesamiento central, localizadas en La Aurora.							<b>X</b>			
<b>8</b>	Retiro de las estaciones NDB's.								<b>X</b>		
<b>9</b>	Estudio de cuales serán las estaciones DVOR/DME que serán apagadas o retiradas.									<b>X</b>	
<b>10</b>	Estado final de la transición. Con el GNSS funcionando totalmente en Guatemala así como las radioayudas DVOR/DME no retiradas, como respaldo.										<b>X</b>

## BIBLIOGRAFÍA

1. Safford, Edward L. *Aviation Electronics Handbook*.  
*TAB BOOKS, Blue Ridge Summit*  
*October 1975.*
2. Wayne, Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*.  
Editorial Prentice Hall. Segunda edición 1996.
3. Collazo, Javier L. *Diccionario enciclopédico de términos técnicos, Inglés-Español Español-Inglés*. Tres volúmenes. Editorial McGraw-Hill 1994.
4. *International Standards and Recommended Practices. AERONAUTICAL TELECOMMUNICATIONS. ANNEX 10 to the convention on international civil aviation. VOLUME 1 ( Radio navigation aids ). Fifth edition of volume 1 – July 1996. ICAO.*
5. *International Standards and Recommended Practices. OPERATION OF AIRCRAFT. ANNEX 6 to the convention on international civil aviation. Part 1 ( International Commercial Air Transport - Aeroplanes ). Eighth edition of part 1 – July 2001. ICAO.*
6. *Plan de navegación aérea. Regiones del Caribe y Suramérica Volumen I, ANP básico. 2000. ICAO Doc 8733.*
7. *Global Navigation Satellite System(GNSS) Manual Appendix AN-Conf/11-IP/14. ICAO.*

8. Manual del sistema geodésico Mundial-1984 (WGS-84 Doc9674) 1997. ICAO.
9. Manual DME 721 Thomson-CSF SDC  
*Maintenance and operating instructions, September 1986.*
10. Manual 512D, Thomson-CSF SDC  
*Maintenance and operating instructions, September 1986.*
11. Manual 512C, Thomson-CSF SDC  
*Maintenance and operating instructions, September 1986.*
12. Ley general de telecomunicaciones. Decreto: 94-96 y sus reformas  
Decretos: 115-97, 47-2002 y 15-2003, del congreso de la república de Guatemala.

#### **Referencias electrónicas**

13. [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps) (última consulta febrero 2006 ).
14. [www.orpac.org](http://www.orpac.org) (última consulta septiembre 2006 ).
15. [www.esa.int](http://www.esa.int) (última consulta noviembre 2006 ).
16. [www.icao.int](http://www.icao.int) (última consulta mayo 2006 ).
17. [www.faa.gov](http://www.faa.gov) (última consulta octubre 2006 ).

18. [www.intelsat.com](http://www.intelsat.com) (última consulta agosto 2006 ).
19. [www.cocesna.org](http://www.cocesna.org) (última consulta septiembre 2006 ).
20. [www.itu.int](http://www.itu.int) (última consulta octubre 2006 ).