

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

---

## Análisis de Requisitos de Integridad para la Implementación del Sistema EGNOS V3 en el Sector Marítimo

---

**Jorge Martínez Lafuente**

Máster Universitario de Ingeniería de Telecomunicación  
Tecnologías de Radiocomunicación

**Gonzalo Seco Granados**

**Germán Cobo Rodríguez**

08 de ENERO de 2021





Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Copyright © 2020 - Jorge Martínez Lafuente.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

© (el autor/a)

Reservados todos los derechos. Está prohibido la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión, la reprografía, el microfilme, el tratamiento informático o cualquier otro sistema, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler y préstamo, sin la autorización escrita del autor o de los límites que autorice la Ley de Propiedad Intelectual.



*“Si he conseguido ver más lejos es porque me he aupado en hombros de gigantes.”*

- *Isaac Newton*



# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor Gonzalo Seco Granados, su buena predisposición, ayuda y consejos que me han facilitado el desarrollo de este trabajo, y sobre todo que me han permitido profundizar en mis conocimientos.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis padres su apoyo y paciencia con mis decisiones. Sin ellos hoy no sería quien soy.

No me puedo olvidar de mi compañera de viaje, que me aguanta y me motiva cada día a ser mejor y a seguir creciendo, personal y profesionalmente.

Y por último a mis amigos, que han hecho todo esto un poco más ameno. Porque si es importante concentrarse en determinados momentos, igual de importante es desconcentrarse en otros.

A todos vosotros, gracias de corazón.





## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Análisis de Requisitos de Integridad para la Implementación del Sistema EGNOS V3 en el Sector Marítimo</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Jorge Martínez Lafuente</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Gonzalo Seco Granados</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	<i>01/2021</i>
<b>Titulación:</b>	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Tecnologías de Radiocomunicación</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>EGNOS, Integridad, Sector Marítimo</i>

### **Resumen del Trabajo:**

El sistema EGNOS es el sistema de aumentación por satélite europeo que proporciona correcciones e integridad sobre el posicionamiento mediante GPS y Galileo. A pesar de que EGNOS tiene aplicación en un gran abanico de ámbitos, su origen, requisitos y diseño han estado siempre influenciados por el sector aeronáutico, ya que en este sector la navegación por satélite juega un papel clave y al mismo tiempo tiene el concepto de integridad bien definido e introducido en su operativa. Sin embargo, hay sectores con un gran peso económico donde la navegación por satélite y la integridad también son esenciales, y uno de ellos es el sector marítimo. Aunque EGNOS tiene obviamente interés en dicho sector, su aplicación no resulta clara dado que no existe una adecuación tan directa entre los requisitos de integridad en el posicionamiento de buques y las prestaciones de EGNOS.

En el trabajo que aquí se desarrolla se pretenden estudiar en primer lugar los principios de funcionamiento de los sistemas SBAS, y más en profundidad de EGNOS. Asimismo, se presentará el concepto de integridad y su implementación a través de los diferentes parámetros que lo caracterizan. Puesto que EGNOS tiene una estrecha relación con el sector aeronáutico, también se expondrá una comparativa con los parámetros en dicho sector. Además, en el trabajo se

presentarán los requisitos y regulaciones sobre integridad existentes en el sector marítimo, cubriendo todos los escenarios operativos posibles.

A partir de los resultados de los puntos anteriores, se extraerán una serie de conclusiones sobre la adecuación y compatibilidad de EGNOS con el sector marítimo, puesto que, con la nueva actualización del sistema EGNOS V3, las prestaciones van a ser ampliadas gracias al empleo de la frecuencia dual y la multi constelación. Finalmente, se propondrán una serie de recomendaciones acerca de las modificaciones futuras en materia regulatoria, así como en el desarrollo de los futuros receptores de los buques, con el objetivo de que EGNOS contribuya a la seguridad y eficiencia de la navegación marítima.

**Abstract:**

EGNOS is the European satellite based augmentation system that provides positioning corrections and integrity through GPS and Galileo. Despite the fact that EGNOS has applications in a wide range of fields, its origin, requirements and design have always been influenced by the aeronautical sector. Thereby, satellite navigation has a key role in this area and at the same time the concept of integrity is well defined and introduced into its operations. Nonetheless, there are fields with great economic weight where satellite navigation and integrity are also essential, and one of them is the maritime sector. Although EGNOS has an obvious interest in this ambit, its application is not clear, as there is not such a direct match between the requirements for integrity in ship positioning and the performance of EGNOS.

In the paper developed here, it is intended to study firstly the operating principles of SBAS systems, and more in particular EGNOS. Likewise, the concept of integrity and its implementation will be presented through the different parameters that characterize it. Due to the fact that EGNOS has a close relationship with the aeronautical sector, a comparison with the parameters in that field will also be presented. In addition, the work will set out the requirements and regulations on integrity existing in the maritime sector, covering all possible operational scenarios.

From the results of the previous points, a set of conclusions will be extracted on the suitability and compatibility of EGNOS with the maritime sector, since, with the new update of the EGNOS V3 system, the performance will be extended thanks to the use of dual frequency and multi constellation. Finally, a series of recommendations will be proposed regarding future modifications in regulatory matters, as well as in the development of future ship receivers, with the aim of making EGNOS contribute to the safety and efficiency of maritime navigation.

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1. Contexto y Justificación del Trabajo .....	1
1.2. Objetivos del Trabajo .....	2
2. Sistemas de Aumentación Basados en Satélite.....	4
2.1. Arquitectura de los Sistemas SBAS.....	4
2.2. Modelo y Fundamento Matemático .....	6
2.3. Estado del Arte de los Sistemas SBAS.....	9
2.3.1. WAAS .....	9
2.3.2. GAGAN .....	10
2.3.3. MSAS .....	11
2.4. Sistema EGNOS .....	12
2.4.1. Arquitectura del Sistema EGNOS .....	13
2.4.2. Estructura del mensaje EGNOS .....	17
2.4.3. Servicios proporcionados por EGNOS .....	19
2.4.4. EGNOS V3.....	21
3. Performance GNSS. Parámetros Fundamentales .....	23
3.1. Integridad .....	24
3.1.1. Conceptos y parámetros de integridad.....	24
3.1.2. Medición de integridad.....	27
3.2. Precisión.....	29
3.3. Disponibilidad .....	29
3.4. Continuidad .....	30
4. Sector Marítimo. Legislación y Regulación Vigente en Materia de Integridad .....	33
4.1. Evolución del concepto de integridad.....	33
4.2. Resolución A.1046 (27).....	36
4.3. Resolución A.915 (22).....	37
4.4. Comparativa con requisitos del sector aéreo .....	39
5. Compatibilidad de EGNOS con los Requisitos de Integridad en Navegación Marítima.....	42
5.1. Prestaciones de Integridad del Sistema EGNOS.....	42
5.2. Comparativa de Requisitos Marítimos y Prestaciones de EGNOS V3..	44
5.3. Adecuación y Líneas Futuras en Materia Regulatoria.....	47
5.4. Consideraciones para el Desarrollo Futuro de Receptores EGNOS para Navegación Marítima .....	49
6. Conclusiones y Líneas Futuras.....	52
6.1. Conclusiones .....	52
6.2. Líneas Futuras.....	53
7. Glosario .....	55
8. Bibliografía.....	57



## Lista de figuras

Figura 1. Principales Sistemas SBAS [5] .....	9
Figura 2. Arquitectura del Sistema de Aumentación Basado en Satélite EGNOS [6] .....	14
Figura 3. Arquitectura de alto nivel del servicio EGNOS EDAS [6] .....	21
Figura 4. Situaciones posibles de navegación en Plano Horizontal con el sistema EGNOS [6] .....	27
Figura 5. Diagrama de Stanford [8].....	27
Figura 6. Contribución de NSE (error del sistema de navegación), CE (error en la carta) y VTE (error técnico de la embarcación) al TSE (error total del sistema) [8] .....	35
Figura 7. Monitorización de la integridad a nivel de usuario [15] .....	48



## Lista de tablas

Tabla 1. Satélites GEO empleados por EGNOS.....	14
Tabla 2. Tipos de mensajes SBAS .....	18
Tabla 3. Especificaciones de la Resolución A.1046(27).....	37
Tabla 4. Especificaciones de la Resolución A.915(22).....	39
Tabla 5. Requisitos de integridad para las diferentes fases de vuelo en aviación civil.....	40
Tabla 6. Prestaciones de EGNOS V3 .....	43
Tabla 7. Comparativa de requisitos de integridad para sector marítimo y prestaciones de EGNOS V3.....	46





# 1. Introducción

La elección del presente Trabajo Fin de Máster obedece a una serie de razones fundamentadas en el estudio de los requisitos de integridad en el ámbito del geoposicionamiento en el sector marítimo, el cual necesita seguir la evolución de otros sectores que se han beneficiado de los sistemas de aumentación por satélite como es el caso del sector aeronáutico. Por supuesto, este ámbito de estudio también se deriva de preferencias personales e inquietudes, que se presentan en apartados consecutivos por medio de objetivos a los cuales se pretende dar solución.

## 1.1. Contexto y Justificación del Trabajo

El transporte marítimo es uno de los sectores con mayor peso económico en el mundo, y tanto la navegación por satélite como la integridad de los sistemas de radio posicionamiento se han convertido en un factor fundamental para que dichos sistemas sigan siendo un elemento esencial en cualquier tipo de buque. En los últimos años, la navegación marítima ha ido evolucionando y ha experimentado una serie de cambios en cuanto a materia de seguridad en navegabilidad se refiere. Los diferentes escenarios a los que se enfrentan los buques, desde entradas a puertos, navegación en canales o estrechos, aguas abiertas, etc., requieren de unas necesidades de posicionamiento específicas que garanticen la seguridad de la navegación.

Recibir datos e información ininterrumpida sobre la posición de un barco es uno de los elementos más importantes para garantizar la seguridad de la navegación de acuerdo con las recomendaciones de la *International Maritime Organization* (IMO), ya sea en zonas marítimas restringidas, costeras e incluso aguas abiertas y oceánicas. Actualmente, la información sobre la posición de un determinado usuario se obtiene mediante un receptor específico capaz de procesar diferentes señales procedentes de los satélites geoestacionarios. En concreto, dichas señales se obtienen de los sistemas de navegación satelital como GPS (sistema americano) o GLONASS (sistema ruso); de los Sistemas de Aumentación Basados en Satélite (SBAS) como el sistema EGNOS (con cobertura en Europa), el sistema WAAS (dando servicio a Canadá y Estados Unidos), el sistema MSAS (cubriendo Japón) o el sistema GAGAN (empleado en India). Existen muchos más sistemas cuya misión es proporcionar las señales necesarias para geoposicionamiento. El nombre genérico con el que se conoce a todos estos sistemas es el *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

Con la aparición de los Sistemas de Aumentación por Satélite (SBAS – *Satellite Based Augmentation System*), aparece una solución que ofrece a los usuarios una capacidad de posicionamiento mucho más precisa, además de información de integridad que asegure en todo momento que el sistema es adecuado para su uso. Estas capacidades ofrecidas por los sistemas SBAS han estado ligadas tradicionalmente al sector aeronáutico, en el que existe una legislación y regulación vigente muy definida por la ICAO (*International Civil Aviation Organization*). El sector marítimo también necesita beneficiarse de estas capacidades, pero basadas en sus propios requisitos de seguridad que deben ser claramente definidos y estudiados. A día de hoy, las regulaciones en materia de integridad para navegación marítima no son tan minuciosas como las definidas en el sector aéreo. No obstante, se revisarán los requisitos y resoluciones actuales de la IMO cubriendo todos los entornos operativos posibles.

## **1.2. Objetivos del Trabajo**

Los principales objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster se pueden enumerar en los siguientes puntos:

- Revisar el estado del arte actual de los sistemas de aumentación por satélite y su influencia en el sector marítimo. Concretamente, el trabajo se centra en el sistema europeo EGNOS, del que se detallarán sus principales características, así como un estudio de su evolución y estado actual.
- Definir tanto los parámetros como el rendimiento del sistema EGNOS.
- Estudiar detalladamente los conceptos que caracterizan un sistema de aumentación GNSS, los cuales son precisión, disponibilidad, continuidad e integridad, haciendo una revisión más en profundidad de este último.
- Analizar los requisitos actuales y la regulación en vigor en materia de integridad en navegación marítima vía GNSS y SBAS.
- Realizar un análisis comparativo sobre las capacidades ofrecidas por el sistema EGNOS V3 y las necesidades actuales en materia de integridad en posicionamiento marítimo, obteniendo conclusiones acerca de su posible compatibilidad.
- Proponer unas líneas futuras de investigación en las que se revise hacia dónde debería evolucionar el sistema EGNOS para satisfacer todas las necesidades en materia de integridad y radio-posicionamiento marítimo.

- Definir una serie de criterios de diseño a seguir para los futuros receptores GNSS en el ámbito marítimo, que integren capacidad para procesar las señales SBAS.

## 2. Sistemas de Aumentación Basados en Satélite

Los Sistemas de Aumentación Basados en Satélite (SBAS), forman parte de un conjunto de sistemas cuya misión es mejorar el rendimiento o *performance* de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). De acuerdo con la *European Global Navigation Satellite Systems Agency* o GSA [1], un sistema GNSS se refiere a la constelación de satélites que proporcionan señales desde el espacio, las cuales transmiten datos de posicionamiento y tiempo a los receptores GNSS. Dichos receptores emplean estos datos para determinar su posición. Los Sistemas de Posicionamiento Global o GPS (*Global Position System*), no fueron diseñados en su día pensando en los requisitos actuales en materia de navegación, por lo que actualmente no son capaces por si mismos de tener el rendimiento necesario para este tipo de aplicaciones. No obstante, la aparición de los sistemas SBAS han servido de complemento a los sistemas GPS tradicionales, para adecuarlos a los requisitos necesarios actuales que aparecen en aplicaciones de radio navegación tanto aérea como marítima.

De manera simplificada, el funcionamiento de los sistemas SBAS obedece a los siguientes pasos. La señal de navegación se monitoriza en una serie de estaciones de referencia terrestres. La información que generan dichas estaciones es transmitida y recogida por una estación maestra encargada de generar la señal de aumentación SBAS. Por medio de estaciones transmisoras de enlaces ascendentes, este mensaje se transmite a la constelación de satélites GEO, los cuales finalmente transmitirán estas señales de aumentación a los receptores de los diferentes usuarios. Dichas señales, contienen mensajes de corrección e integridad que permiten a los receptores estimar su posición de una manera mucho más precisa y disponer de información sobre la calidad de la señal. Así, los sistemas SBAS empleados de manera conjunta con el sistema GPS, pueden llegar a ser una solución factible que cumpla los requisitos actuales en materia de integridad en el sector del radio posicionamiento marítimo, como se va a analizar en apartados posteriores.

### 2.1. Arquitectura de los Sistemas SBAS

De igual manera que en los sistemas GNSS, la arquitectura de los sistemas SBAS se puede sintetizar por medio de segmentos funcionales. Los sistemas SBAS cuentan con un segmento más que los sistemas GNSS, por lo que un sistema SBAS, como es el caso de EGNOS, está formado por cuatro segmentos funcionales. Dichos segmentos, como se puede consultar en [2], se dividen en: Segmento Terrestre (o *Ground Segment*), Segmento de Apoyo (o *Support Segment*), Segmento Espacial (o *Space Segment*) y Segmento de Usuario (o *User Segment*). Las

características principales de cada uno de estos segmentos se desarrollan a continuación.

- Segmento Terrestre – la misión de este segmento es recopilar la información de posicionamiento y generar el mensaje de aumentación para enviarlo hacia el segmento espacial. El segmento espacial, formado por los satélites GEO, recibirá por medio de sus transpondedores dicha señal. A su vez, el Segmento Terrestre está formando por varios subsistemas que desempeñan unas funciones determinadas.
  - Red de Estaciones de Monitorización: formada por un conjunto de estaciones receptoras que supervisan tanto la constelación de satélites GNSS, como el estado de la ionosfera. Esta red está compuesta por diversas estaciones para dotar de redundancia frente a fallos al subsistema. Las estaciones están localizadas en emplazamientos específicos en los que los fenómenos de interferencia y multitrayecto se minimicen.
  - Centro de Procesado: es el elemento encargado del procesamiento de la información y de generar la información de aumentación. Sintetiza la información captada por las estaciones receptoras de monitorización, para aplicar las correcciones oportunas y generar la señal con los datos de corrección de acuerdo con los estándares SBAS.
  - Centro de Control de Satélites Geoestacionarios: se encarga de codificar la señal de información de una forma similar a las señales GPS, para modular dicha señal con el mensaje de aumentación y el código PRN (*Pseudorandom Noise Code*). De acuerdo con el tiempo de referencia SBAS, se sincroniza la referencia temporal para enviar la señal al Segmento Espacial y posteriormente monitorizar la señal de bajada emitida por los transpondedores de la constelación.
  - Capa de Comunicaciones: consiste en una red que interconecta cada uno de los subsistemas del Segmento Terrestre, asegurando una conexión en tiempo real y con un ancho de banda adecuado para poder intercambiar la información recogida.
- Segmento de Apoyo – este segmento engloba todos aquellos sistemas y elementos que no forman parte de manera estricta del sistema SBAS, pero que son necesarios de manera externa como sistemas de apoyo en las etapas de diseño, puesta en marcha, verificación, validación, certificación y sostenimiento. Forman parte de este segmento los sistemas de simulación y entrenamiento que permiten modelar de manera completa el comportamiento del sistema, algoritmos para predicción de fallos, herramientas de análisis y diagnóstico, así como software de

monitorización de prestaciones (análisis de parámetros, precisión, disponibilidad, integridad, continuidad, etc.).

- Segmento Espacial – formado por un conjunto de satélites geostacionarios encargados de recibir la señal de aumentación SBAS enviada por el Segmento Terrestre, y retransmitirla hacia los usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura del servicio. Generalmente, la constelación la forman satélites multi propósito que dedican una serie de transpondedores a proporcionar el servicio SBAS, generando el mensaje de navegación y transmitiendo la señal ‘tipo GPS’ (o *GPS-Like*). Estos transpondedores reciben la señal del enlace ascendente en banda C, y la retransmiten hacia la zona de cobertura por medio de un enlace descendente en banda L. Actualmente, se ha implementado el uso de dos bandas frecuenciales para conseguir minimizar los efectos que inducen las capas de la atmósfera, además de incrementar el ancho de banda.
- Segmento de Usuario – integrado por todos los receptores que emplean el servicio de aumentación SBAS. Existen diferentes tipos de servicios que se ofrecen al Segmento Usuario: Open Service (OS), Safety of Life (SoL) enfocado a la radio navegación, o Data Access Service (DAS). Todos estos servicios se desarrollan de manera más profunda en apartados posteriores.

Una vez definida la arquitectura básica que compone un sistema SBAS, en el apartado siguiente se va a exponer el modelo matemático sobre el que se apoyan los sistemas de aumentación por satélite. Posteriormente se definirán algunos de los sistemas SBAS más populares actualmente y las zonas de cobertura sobre las que proporcionan servicio, para profundizar finalmente en el sistema EGNOS, sobre el cual gira el estudio de este Trabajo Fin de Máster y sobre el cual se va a poner especial interés en detallar cada una de sus características.

## **2.2. Modelo y Fundamento Matemático**

Los sistemas GNSS actuales calculan la posición del receptor empleando triangulación esférica, mediante los pseudo-rangos disponibles en cada satélite gracias a la señal de navegación. Este estudio se aleja del objetivo de este Trabajo Fin de Máster por lo que no se entrará en detalle en la explicación de estos conceptos y cálculos matemáticos. Por otro lado, la solución de la posición se puede describir con su correspondiente modelo matemático, el cuál si es de interés en este apartado y se va a desarrollar a continuación. Partiendo de esta ecuación se detalla el proceso matemático que permite calcular las correcciones efectuadas por un sistema de aumentación SBAS basado en satélite [3] [4].

La distancia geométrica comprendida entre un punto  $i$  y un satélite  $j$  viene dada por:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - x_i)^2 + (Y^j(t) - y_i)^2 + (Z^j(t) - z_i)^2} \quad (1)$$

Siendo  $X^j(t)$ ,  $Y^j(t)$  y  $Z^j(t)$  cada una de las tres coordenadas del vector que define la posición del satélite  $j$  en un instante  $t$ , y las incógnitas  $x_i$ ,  $y_i$  y  $z_i$  cada una de las coordenadas que definen el punto  $i$ . La pseudodistancia entre un receptor  $i$  y un satélite  $j$  en un instante  $t$ , se determina como:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c\Delta\delta_i^j(t) \quad (2)$$

Donde el parámetro  $R_i^j(t)$  expresa la pseudodistancia medida entre el receptor  $i$  y el satélite  $j$ .  $\Delta\delta_i^j(t)$  recoge las desviaciones sufridas por los relojes del satélite y del receptor respecto al tiempo GPS. Si se expanden estos términos relativos al error de los relojes, la ecuación (2) se puede expresar como:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) - c\Delta\delta^j(t) + c\Delta\delta_i(t) \quad (3)$$

Si se particulariza la ecuación (3) para una estación base específica  $A$ , cuya posición se mide en el instante  $t_0$ , además de añadir el término correspondiente al error radial de la órbita del satélite junto con los fenómenos atmosféricos de refracción en la ionosfera y troposfera  $\Delta\rho_A^j(t_0)$ , se obtiene la expresión:

$$R_A^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) + \Delta\rho_A^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_A(t_0) \quad (4)$$

Puesto que la posición de la estación base  $A$  es conocida, el término  $\rho_A^j(t_0)$  no incluye nuevas incógnitas en el problema. En el instante  $t_0$ , la diferencia entre la distancia real y la medida de la pseudodistancia corresponderá con la corrección de la pseudodistancia (PRC o *pseudo-range correction*):

$$PRC^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) - R_A^j(t_0) = -\Delta\rho_A^j(t_0) + c\delta^j(t_0) - c\delta_A(t_0) \quad (5)$$

Por medio de una serie temporal de correcciones en pseudodistancias, se puede calcular la variación que presentan haciendo uso de una derivación numérica

(RRC), definiendo la función que permite calcular la corrección de pseudodistancias en un instante cualquiera:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0) \quad (6)$$

El intervalo temporal definido en la ecuación (6) es crítico a la hora de conseguir la máxima precisión. Si se incluye ahora una nueva estación base B, su pseudodistancia con el mismo satélite  $j$  en un instante  $t$ , viene dada por:

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_B(t) \quad (7)$$

Aplicando la corrección de pseudodistancia encontrada en la ecuación (6), se obtiene la pseudodistancia corregida de la nueva estación B:

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) \quad (8)$$

Si se desarrolla el término de la corrección, se obtiene que:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + c(\delta_B(t) + \delta_A(t)) \quad (9)$$

Siguiendo las ecuaciones (5) y (6), el término  $PRC^j(t)$  puede sustituirse por el valor definido en éstas, suprimiendo así el error asociado al reloj del satélite. Si además, se supone que el error de órbita para las distancias tanto de la estación A como de la estación B desde el satélite  $j$  es el mismo, se anulan el uno con el otro, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (10)$$

Obteniendo en el último término el error combinado de los relojes de las estaciones A y B:

$$\Delta\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t) \quad (11)$$

Siguiendo todo el planteamiento, se concluye que de esta manera se consigue eliminar de forma matemática el error asociado al reloj incorporado en el satélite,



los errores atmosféricos asociados a la troposfera y la ionosfera, además de los errores de posición en los satélites de la constelación.

### 2.3. Estado del Arte de los Sistemas SBAS

En la actualidad, existen diversos proyectos activos en materia de sistemas de aumentación por satélite. Cada uno de ellos ha sido enfocado para dar cobertura a una determinada región del planeta, siendo EGNOS el sistema europeo y WAAS el sistema americano. En la figura 1 consultada en [5], se puede revisar el mapa de cobertura aproximado de cada uno de estos sistemas. A continuación, se van a exponer las principales características de algunos de ellos, para posteriormente profundizar en el sistema EGNOS, el cual es el que más interés tiene en el estudio de este trabajo.

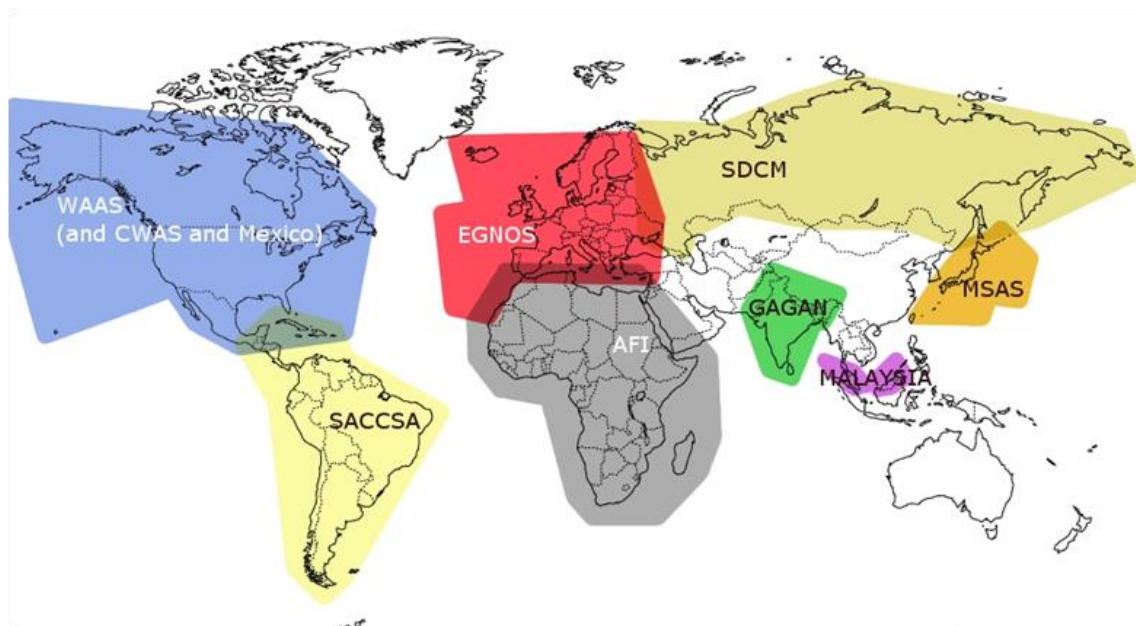


Figura 1. Principales Sistemas SBAS [5]

#### 2.3.1. WAAS

El sistema WAAS (*Wide Area Augmentation System*) es el sistema SBAS que da cobertura a los Estados Unidos de América, Canadá, Alaska y México (prácticamente un área de cobertura que abarca el 95% del territorio estadounidense). El programa se inició en 1992 y fue una iniciativa de la FAA (*Federal Aviation Agency*). En el año 2003 el sistema quedó totalmente operativo, centrandose su funcionamiento especialmente en la comunidad de la aviación civil y activando el servicio *Safety of Life*. Desde entonces, el sistema WAAS ha sido sometido a diversas mejoras y revisiones, encontrándose actualmente en su

tercera versión que pretende implementar el uso de frecuencias duales para la mejora de las prestaciones del servicio de aumentación.

Las señales del sistema WAAS transmiten información aumentada que corrige las efemérides del GPS y asegura el cumplimiento de los requisitos de integridad, especialmente centrados en el sector de la aviación. Para ser capaces de beneficiarse de la señal proporcionada por WAAS, los usuarios han de estar equipados con receptores certificados que sean capaces de interpretar la información transmitida por el sistema de aumentación.

El sistema WAAS, dispone de múltiples satélites en órbita GEO, así como diversas estaciones de referencia, centros de subida y centros maestros los cuales tienen la función de generar el mensaje WAAS. El sistema cuenta con múltiples receptores distribuidos por toda la zona de cobertura y son numerosos los usuarios (principalmente receptores embarcados en aeronaves) que son capaces de beneficiarse del sistema de aumentación proporcionado por este sistema SBAS.

Por último, los objetivos del sistema WAAS son incrementar la integridad, exactitud, disponibilidad y continuidad del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) de GPS dedicado a la comunidad de aviación civil. El objetivo final es proporcionar un sistema de navegación que pueda emplearse en todas las fases de vuelo mediante la aproximación de precisión. En concreto, los procedimientos de vuelo habilitados actualmente son:

- Navegación Lateral (LNAV) y Navegación Vertical (VNAV).
- *Localizer Performance* (LP)
- *Localizer Performance with Vertical Guidance* (LPV)
- *Localizer Performance with Vertical Guidance down to CAT I Precision* (LPV-200)

### **2.3.2. GAGAN**

El sistema GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation System*) es el sistema de aumentación implementado por el Gobierno de la India. Este sistema tiene sus orígenes en el año 2001 cuando las Autoridades Aeroportuarias de la India y la ISRO (*Indian Space Research Organization*) alcanzaron un acuerdo para desarrollar el sistema GAGAN. No obstante, hasta el año 2013 no se validó el sistema, debiendo realizar unas exhaustivas pruebas de rendimiento de todos los componentes del sistema, así como de sus satélites.

Los principales componentes de la arquitectura de GAGAN son:

- Segmento Espacial – compuesto por un total de tres satélites GEO operativos. Los satélites GSAT-8 y GSAT-10 fueron lanzados en los años 2011 y 2012 respectivamente, mientras que el tercer satélite que completó la constelación fue lanzado en el año 2014.
- Segmento Terrestre – existen un total de quince estaciones de referencia (INRES – *Indian Reference Stations*) encargadas de recibir y procesar la señal de GPS. La estación de control maestra (INMCC – *Indian Master Control Center*), compuesta por dos subestaciones y situada en Bangalore, procesa toda la información recogida por las estaciones de referencia para calcular las correcciones diferenciales y estimar su nivel de integridad. El mensaje SBAS generado por las dos subestaciones de control maestras se manda en un enlace de subida hacia los tres satélites GEO a través de las correspondientes estaciones de subida (INLUS – *Indian Land Uplink Station*).
- Segmento de Usuario – los receptores capaces de procesar las señales de GAGAN, disponen de la misma tecnología que los receptores WAAS. Estos receptores dedicados principalmente al ámbito de la aviación civil deben cumplir con las mismas certificaciones SBAS que el resto de sistemas desplegados.

Los satélites GAGAN distribuyen la señal de navegación aumentada SBAS por medio de las bandas L1 y L5. Existe una dificultad particular que el sistema GAGAN debe afrontar, y viene derivada por el cinturón de anomalía ionosférica presente en las latitudes de cobertura del sistema. Esta anomalía repercute directamente en la señal aumentada y en los receptores, siendo necesarios unos requisitos más exigentes en cuanto a precisión e integridad se refieren, para poder asegurar los requerimientos de seguridad necesarios para su operación.

### 2.3.3. MSAS

El sistema MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System*) es el sistema de aumentación basado en satélite implementado en Japón. Para ofrecer un sistema de aumentación con una buena precisión, integridad y disponibilidad, emplea la constelación MTSAT (*Multifunctional Transport Satellites*) perteneciente y operada por diversos organismos estatales de Japón. El sistema está operativo para ofrecer

servicios de aumentación a la aviación desde el año 2007, ofreciendo servicios de guiado horizontal para fases *En-route* a través de *Non-Precision Approachs*.

MSAS procesa los datos GPS recogidos por una red de estaciones de referencia distribuida por todo el país. El funcionamiento de sistema es similar al resto de sistemas SBAS, siendo los principales componentes de su arquitectura los siguientes:

- Segmento Terrestre – formado por cuatro estaciones de monitorización terrestres (GMS – *Ground Monitor Station*) que recogen la información de las señales GPS y de la constelación MTSAT. Las estaciones GMS, una vez recopilados los datos de los satélites, los transmiten a las dos estaciones maestras (MCS – *Master Control Station*) localizadas en las ciudades de Kobe y Hitachiota, las cuales procesan de manera precisa las correcciones diferenciales y la información de integridad, retransmitiéndolas a los satélites de la constelación MTSAT para su posterior radiodifusión de vuelta a la zona de cobertura japonesa. El segmento terreno del sistema MSAS tiene la peculiaridad de contar con dos estaciones de monitorización (MRS – *Monitor and Ranging Station*) cuyo objetivo es determinar los datos de corrección de la órbita de los satélites que forman parte de la constelación MTSAT.
- Segmento Espacial – compuesto por dos satélites GEO, que forman la constelación MTSAT. Estos satélites se emplean habitualmente con propósitos meteorológicos. No obstante, tienen transpondedores dedicados en su carga útil para propósitos de navegación y radiodifusión de los mensajes de corrección del sistema MSAS.
- Segmento de Usuario – formando por los receptores GPS y SBAS que emplean la información de corrección transmitida por el Segmento Espacial, con propósitos de mejorar la precisión y la integridad.

Los servicios que proporciona MSAS a la aviación, fueron acordados en el año 2007 y algunas de sus características principales son que debe estar operativo veinticuatro horas al día durante los siete días a la semana.

## **2.4. Sistema EGNOS**

El Servicio Geoestacionario Europeo de Cobertura a la Navegación, o también conocido por sus siglas como sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*), es el sistema de aumentación basado en satélite gestionado por la comunidad europea. EGNOS ha sido desarrollado de manera conjunta por la

Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea (institución de la Unión Europea) y Eurocontrol. El sistema EGNOS tiene como propósito complementar las señales transmitidas por los sistemas GPS en materia de navegación, proporcionando una mayor precisión y seguridad de los servicios que ofrece éste. EGNOS ha resultado ser una de las iniciativas tecnológicas en materia de posicionamiento vía satélite, que han sido impulsadas en el ámbito europeo, junto al programa Galileo. Ambos programas tienen como objetivo complementarse y dotar de un sistema de posicionamiento preciso y seguro que sirva como alternativa a sistemas desarrollados por otros países y ya consolidados, como GPS y GLONASS.

El sistema EGNOS surge para dar solución a la necesidad derivada del aumento en la exigencia de los requisitos en el ámbito de navegación, y especialmente en el sector aéreo. Los requisitos de precisión y seguridad en las señales de posicionamiento vía satélite cada vez más son más estrictos, de manera que la navegabilidad no se vea comprometida. EGNOS ofrece solución a la necesidad de disponer de un sistema operado por la comunidad europea y que permita satisfacer los compromisos y requisitos de usuario fijados por los organismos de navegación, tanto en el sector aeronáutico como en el marítimo, además de sus aplicaciones terrestres. Proporcionando un sistema de aumentación a las señales de las constelaciones GPS, GLONASS y también Galileo, EGNOS constituye el sistema SBAS europeo, transmitiendo continuamente por medio de satélites GEO las correcciones diferenciales e información de integridad de la señal requeridas.

En la actualidad, EGNOS proporciona cobertura no sólo al área geográfica europea, si no que cubre también el Norte de África. De esta manera, EGNOS pasa a formar parte de un proyecto interregional y multimodal que pretende proporcionar servicios SBAS en un amplio espectro de aplicaciones y para diversas comunidades de usuarios que abarcan desde el transporte marítimo, aviación, ferrocarriles o aplicaciones para la agricultura moderna.

#### **2.4.1. Arquitectura del Sistema EGNOS**

La arquitectura del sistema EGNOS aparece representada en la figura 2, y se compone de dos segmentos diferenciados: el segmento espacial y el segmento terrestre. Para poder proporcionar sus servicios a los usuarios que equipen receptores capaces de procesar las señales transmitidas por EGNOS, cada uno de los elementos que conforman ambos segmentos tiene unas funciones definidas que se van a exponer a continuación.

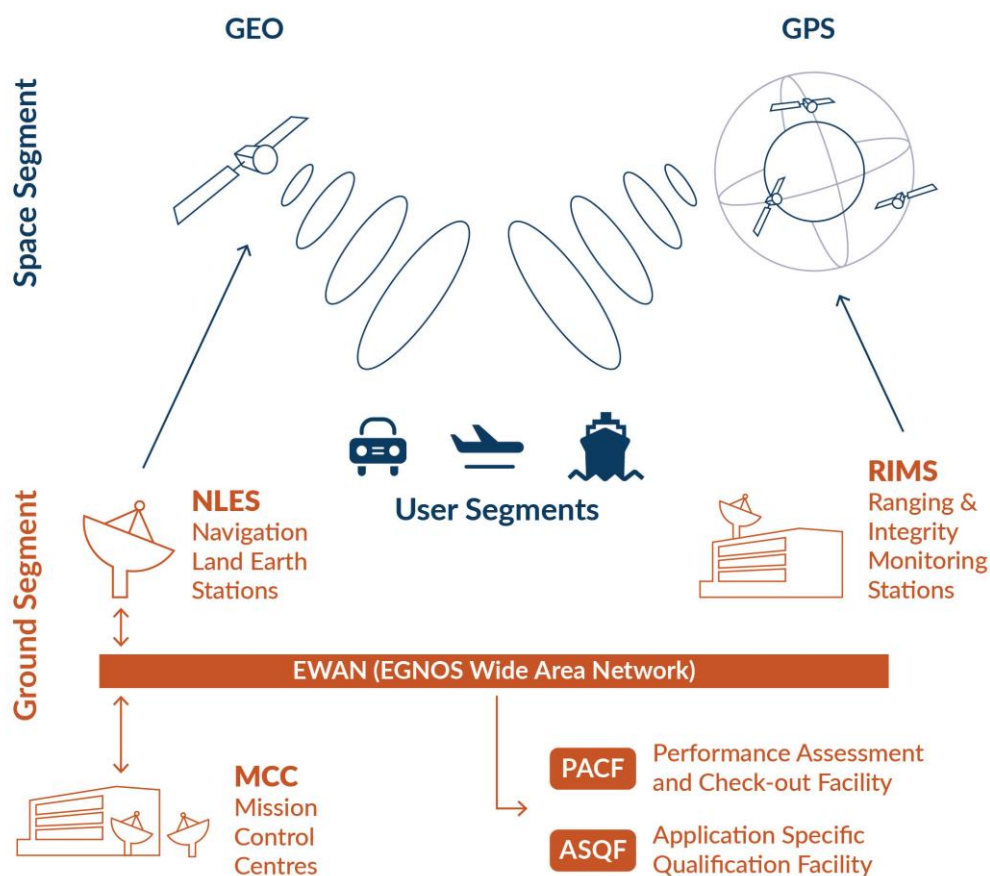


Figura 2. Arquitectura del Sistema de Aumentación Basado en Satélite EGNOS [6]

El Segmento Espacial de EGNOS está compuesto por cinco satélites geostacionarios que transmiten mediante radiodifusión las correcciones y la información de integridad para satélites GPS en la banda frecuencial L1 (1575,42 MHz). En la actualidad los cinco satélites operativos son los que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Satélites GEO empleados por EGNOS

Nombre GEO	Número PRN	Slot Orbital
Inmarsat 3F2 AOR-E	PRN 120	15.5 W
Astra SES-5	PRN 136	5 E
Inmarsat 4F2 EMEA	PRN 126	64 E
Astra - 5B	PRN 123	31.5 E
Eutelsat 5 West B	No Asignado	5 W

Los satélites GEO de la constelación, INMARSAT 3F2 AOR-E (PRN 120) y SES-5 (PRN 136) forman parte de la plataforma operacional y transmiten la denominada *Signal-In-Space* (SIS) que es usada y procesada por los usuarios de EGNOS. Por otra parte, los satélites INMARSAT 4F2 EMEA (PRN 126) y ASTRA-5B (PRN 123) son parte de la plataforma de test de EGNOS y transmiten por radiodifusión la señal TEST SIS. El quinto satélite, EUTELSAT 5 West B, fue lanzado en octubre de 2019 y tiene como objetivo evolucionar la constelación hacia EGNOS V3 en la que se aumentarán señales tanto de Galileo como de GPS empleando multibanda (L1 y L5).

La configuración del segmento espacial proporciona un alto nivel de redundancia al sistema en toda el área de cobertura en caso de que uno de los satélites GEO quede inoperativo. El sistema EGNOS está configurado de tal manera que, en cualquier instante temporal, al menos dos de los cuatro satélites GEO estén difundiendo la señal operativa SIS. Aunque solamente es necesario seguir un único satélite GEO para obtener los mensajes de aumentación, esta configuración del sistema lo dota de una capacidad de conmutación en caso de interrupción del servicio y asegura un alto nivel de continuidad de éste.

Se pretende que el segmento espacial de EGNOS sea reaprovisionado a lo largo de la vida operativa de éste, para mantener así un nivel de redundancia similar al actual. La posición orbital de los futuros satélites podría variar, aunque esto no afectará al servicio ofrecido a los actuales usuarios. De forma similar, se podrían asignar nuevos códigos PRN a los futuros satélites GEO. Es importante remarcar que estos cambios en el segmento espacial de EGNOS se podrán llevar a cabo sin afectar a la calidad del servicio y no supondrán ningún tipo de interrupción de éste, no comprometiendo en ningún caso las características de EGNOS.

Respecto al Segmento Terrestre, comprende una red de estaciones para monitorizar la integridad denominadas *Ranging Integrity Monitoring Stations* (RIMS), dos centros de control de misión llamados *Mission Control Centres* (MCC), seis estaciones terrestres de navegación conocidas también como *Navigation Land Earth Stations* (NLES), y la red de área extensa de EGNOS o EWAN la cual proporciona la red de comunicaciones para todos y cada uno de los componentes del segmento terrestre. Existen también dos instalaciones adicionales desplegadas como parte del segmento terreno para apoyar las operaciones del sistema y la prestación de servicios, denominadas respectivamente como *Performance Assessment and Checkout Facility* (PACF) y *Application Specific Qualification Facility* (ASQF), las cuales son operadas por el suministrador del servicio EGNOS o *EGNOS Service Provider* (ESSP SAS). Estos subsistemas se presentan en detalle a continuación.

- *Ranging Integrity Monitoring Stations (RIMS)* – la principal función de las RIMS es reunir las señales de los satélites GPS y transmitir estos datos cada segundo al CPF o *Central Processing Facilities* de cada MCC. La red actual está formada por un total de 39 emplazamientos RIMS localizados a lo largo de toda el área de cobertura de EGNOS.
- *Central Processing Facility (CPF)* – es el módulo de los MCC que utiliza los datos recibidos por la red desde las estaciones RIMS para:
  - Elaborar las correcciones de reloj para cada satélite GPS. Estas correcciones son válidas a través de toda el área sobre la que se difunde la señal GPS (en todos los lugares sobre los que se recibe la señal EGNOS).
  - Elaborar las correcciones de las efemérides para mejorar la precisión de las posiciones orbitales de los elementos de la constelación. En principio, todas esas correcciones son también válidas a través de toda el área de cobertura del sistema. No obstante, a causa de la distribución de las estaciones de monitorización y de la propia red, la precisión de estas correcciones se verá degradada a medida que los usuarios se alejen del núcleo del área de servicio de EGNOS.
  - Elaborar un modelo para los errores ionosféricos producidos dentro del área de servicio de EGNOS para compensar las perturbaciones ionosféricas en las señales de navegación.

Este grupo de tres correcciones se transmite a todos los receptores de los usuarios, mejorando la precisión de su posicionamiento. Además, el CPF estima los errores residuales que pueden esperar los usuarios una vez hayan aplicado el grupo de correcciones difundidas por EGNOS. Estos errores residuales están caracterizados por dos parámetros principales:

- *User Differential Range Error (UDRE)* – es una estimación del error residual de rango que aparece después de aplicar las correcciones de reloj y de efemérides para un satélite GPS predeterminado.
- *Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE)* – es una estimación del error residual vertical después de aplicar las correcciones ionosféricas para un punto geográfico determinado.

Estos dos parámetros se pueden emplear para determinar un error global delimitado tanto en el plano vertical como en el horizontal. Esta información es realmente útil para los usuarios del servicio *Safety of Life*



además de que podría ser muy beneficiosa para otras comunidades que necesiten conocer el grado de incertidumbre en la posición determinada por el receptor del usuario.

Por último, el CPF incluye un amplio número de funciones de monitorización empleadas para detectar cualquier anomalía en el GPS y en el propio sistema EGNOS, siendo capaz de avisar a los usuarios en un periodo de tiempo muy corto (menor al *Time To Alert* o TTA, como se verá en apartados posteriores) en caso de que un error exceda un cierto umbral.

- *Navigation Land Earth Stations* (NLES) – los mensajes generados en el CPF son transmitidos a las estaciones NLES. Estas estaciones transmiten el mensaje EGNOS recibido desde el CPF a los satélites GEO para que estos lo difundan a los usuarios y aseguren la sincronización con la señal GPS. Hay dos estaciones NLES por cada satélite GEO, de manera que se asegure la redundancia y seguridad de los datos.
- *Central Control Facility* (CCF) – el sistema EGNOS es controlado a través del CCF, localizado en cada uno de los Centros de Control de Misión o MCC. Estas instalaciones están dotadas de personal las 24 horas del día durante los 7 días de la semana para asegurar la vigilancia y el control permanente del servicio.

#### **2.4.2. Estructura del mensaje EGNOS**

Los satélites GEO del sistema EGNOS transmiten sus señales en la banda L a 1575,42 MHz (L1) y emplean polarización circular a derechas. La señal emitida es una combinación de un código de navegación PRN de 1023 bits de la familia de GPS y un mensaje de datos de navegación de 250 bits por segundo que lleva las correcciones y los datos de integridad elaborados por el segmento terrestre de EGNOS.

Resulta de gran interés estudiar la estructura del mensaje EGNOS de manera que pueda ser comprendida la forma en la que los receptores EGNOS son capaces de interpretar y decodificar los mensajes para implementar las correcciones. El mensaje de navegación en bruto contiene 500 bits, pero solamente la mitad tienen información relevante para los usuarios. La otra mitad se emplea para codificar la señal por medio de un proceso de convolución. Los 250 bits del mensaje de datos de navegación pueden dividirse en cuatro partes diferenciadas:

- Preámbulo – formado por 8 bits y cuya misión es sincronizar las señales GPS y SBAS.

- Identificador de tipo de mensaje – formado por 6 bits. Identifica el tipo de mensaje transmitido o *Message Type* (MT). A pesar de poder codificar hasta 64 tipos de mensajes, actualmente solo se encuentran definidos 20.
- Contenido de datos – formado por 212 bits. Transmite la información útil sobre correcciones y sobre integridad. Varía en función del tipo de mensaje.
- Información de paridad – formado por los 24 bits restantes. Introducen paridad para reforzar al mensaje frente a errores aleatorios.

La tabla 2, que puede consultarse en [6], recoge los diferentes tipos de mensajes definidos actualmente, así como su contenido y su propósito.

Tabla 2. Tipos de mensajes SBAS

MT	Contenido	Propósito
0	No Usar (SBAS Test Mode)	Descarta cualquier dato de <i>ranging</i> , correcciones e integridad de esa señal PRN. Empleado durante pruebas de sistema
1	Máscaras PRN	Indica los slots para los datos proporcionados por los satélites GPS y GEO
2-5	Correcciones rápidas	Correcciones de distancia y precisión
6	Información de integridad	Información de precisión para todos los satélites en un solo mensaje
7	Factor de degradación de correcciones rápidas	Información sobre la degradación de las correcciones rápidas
9	Parámetros de la función de <i>ranging</i> GEO	Información de las órbitas de los satélites GEO (Efemérides)
10	Parámetros de degradación	Información sobre la degradación de la corrección al perder el mensaje
12	Tiempo SBAS / Parámetros de compensación UTC	Parámetros de sincronización temporal de SBAS con tiempo UTC
17	Almanaque de la constelación GEO	Almanaques GEO
18	Máscaras de la red ionosférica	Indicaciones sobre en qué punto geográfico se están proporcionando correcciones ionosféricas
24	Correcciones rápidas mixtas / a largo plazo de errores de satélite	Correcciones rápidas para hasta seis satélites y correcciones de errores a largo plazo para un satélite en un solo mensaje

25	Correcciones a largo plazo de errores de satélite	Correcciones de efemérides de satélite y errores de reloj para hasta dos satélites
26	Correcciones de retardo ionosférico	Retrasos verticales / límites de precisión en determinados puntos geográficos
27	Mensaje de servicio EGNOS/SBAS	Define la región geográfica del servicio
28	Matriz de covarianza de las efemérides y del reloj	Matriz de covarianza de efemérides y de reloj
62	Mensaje interno de comprobación	Mensaje interno
63	Mensaje nulo	Mensaje de relleno si no hay otro mensaje disponible

### 2.4.3. Servicios proporcionados por EGNOS

EGNOS proporciona correcciones e información de integridad sobre las señales GPS a lo largo de una amplia zona centrada sobre el continente europeo. Además, es totalmente interoperable con otros sistemas SBAS existentes hoy en día. El sistema EGNOS proporciona un total de tres servicios diferentes. Todos estos servicios están disponibles y se garantiza su distribución a lo largo de sus respectivas áreas de cobertura. Los tres servicios ofrecidos por EGNOS consisten en:

- Open Service (OS) – el objetivo primordial de EGNOS OS es mejorar la precisión de posicionamiento alcanzable mediante correcciones en varias fuentes de error que afectan a las señales GPS. Las correcciones transmitidas por EGNOS contribuyen en mitigar las fuentes de error que afectan al *ranging*, como los relojes de los satélites, la posición de los elementos de la constelación GPS o los efectos ionosféricos. Otras fuentes de error (efectos troposféricos, multitrayecto o contribuciones de los receptores de los usuarios) son efectos locales que no admiten correcciones mediante un sistema de aumentación SBAS. EGNOS también es capaz de detectar distorsiones que afecten a las señales transmitidas por GPS e impedir que los usuarios se enganchen a señales poco confiables o que puedan ser engañosas. El servicio EGNOS OS es accesible en Europa a cualquier usuario que esté equipado con un receptor adecuado y que sea compatible con GPS/SBAS. Este servicio lleva disponible desde octubre de 2009.

- Safety of Life Service (SoL) – el objetivo principal de EGNOS SoL es apoyar las operaciones de aviación civil sobre el Rendimiento de Localización con Guiado Vertical Mínimo o LPV (*Localiser Performance with Vertical Guidance*). Para este servicio, se ha llevado a cabo una definición de los requisitos muy detallada y precisa durante mucho tiempo. No obstante, estos requisitos solamente han sido expresados enfocándolos a la aviación civil. En el futuro próximo, esta caracterización de requisitos se extrapolará a otros ámbitos como el marítimo o el ferroviario. Con el fin de proporcionar el servicio SoL, el sistema EGNOS se ha diseñado para que la Señal en el Espacio SiS cumpliera la normativa ICAO SARPS para SBAS. El servicio EGNOS SoL lleva operativo desde marzo de 2011, mediante el documento de aplicación SDD. Desde entonces han sido diversas las versiones que se han actualizado de este documento, siendo la última versión de septiembre de 2015 publicada con el nombre de EGNOS SoL SDD v3.0. Este documento define las siguientes operaciones basadas en SBAS y que cumplen con los requisitos fijados por ICAO:
  - Operaciones de aproximación de no-precisión y otras operaciones de vuelo que apoyen las especificaciones de navegación PBN diferentes de RNP APCH, no solo durante aproximaciones, si no también durante otras fases de vuelo.
  - Operaciones de aproximación con guiado vertical que apoyen la especificación de navegación RNP APCH - LPV hasta mínimos APV-I (hasta 250 pies de altitud) y LPV-200 (hasta 200 pies de altitud).
  - Aproximaciones de precisión Categoría I con Límite de Alerta Vertical o VAL, igual a 35 metros y apoyando la especificación de navegación RNP APCH PBN hasta mínimos LPV tan bajos como 200 pies de altitud.
  
- EGNOS Data Access Service (EDAS) – EDAS es el servicio de datos terrestres de EGNOS que ofrece acceso desde tierra a los datos de EGNOS en tiempo real y también mediante un archivo histórico FTP a los usuarios autorizados. EDAS es el único punto de acceso para los datos recogidos y generados por la infraestructura terrestres de EGNOS (RIMS y NLES principalmente) distribuidos a lo largo de Europa y África septentrional. Los proveedores de aplicaciones pueden conectarse al EGNOS Data Server y explotar los productos ofrecidos por EGNOS, como pueden ser servicios de alta precisión para clientes finales. El servicio EGNOS EDAS lleva operativo desde julio de 2012. Para más información sobre su arquitectura, se puede consultar la figura 3.

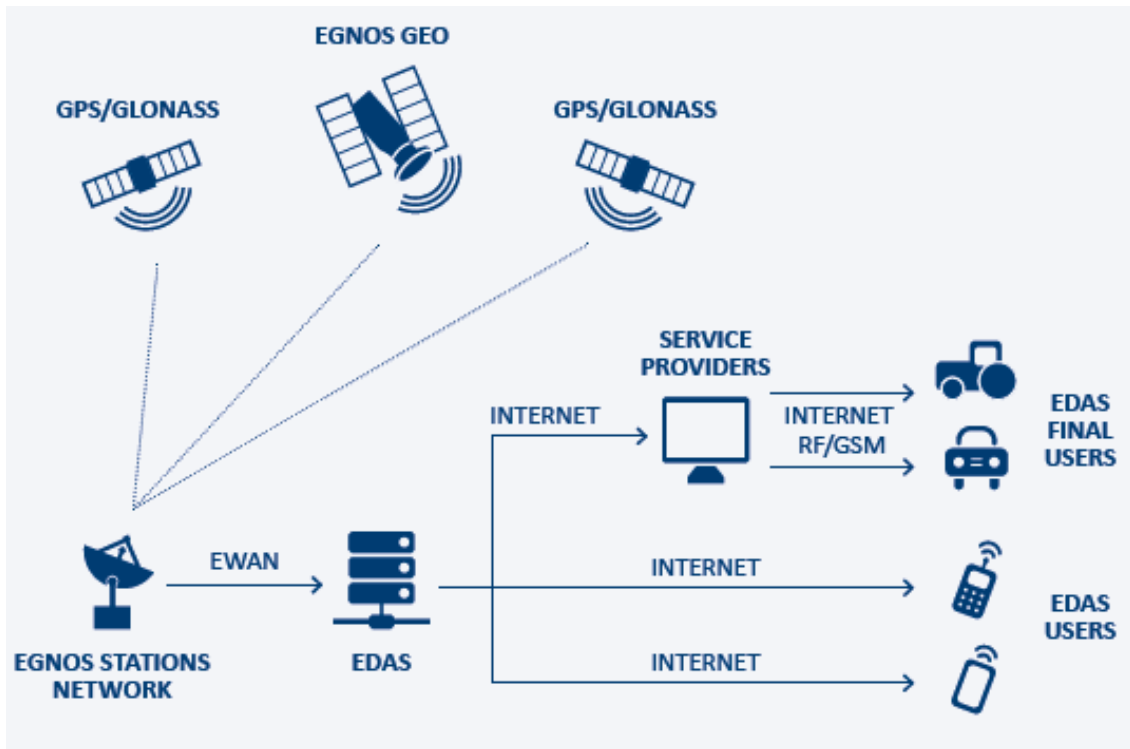


Figura 3. Arquitectura de alto nivel del servicio EGNOS EDAS [6]

#### 2.4.4. EGNOS V3

EGNOS V3 se convertirá en los próximos años en la nueva generación del sistema europeo de aumentación basado en satélite. Esta nueva actualización, tiene como objetivo mejorar los servicios que se ofrecen a la comunidad aeronáutica y ampliar el número de servicios ofrecidos para usuarios en mar y tierra. EGNOS V3 va a permitir emplear la constelación de satélites de Galileo, que podrá ser usada junto a GPS, convirtiendo a EGNOS V3 en el primer sistema que implemente un estándar mundial multiconstelación y de frecuencia dual o DFMC (*Dual Frequency Multi Constellation*).

Para la siguiente generación de EGNOS, la GSA establece una serie de nuevas prestaciones y capacidades que el sistema debe cumplir. En concreto, EGNOS V3 debe ser capaz de apoyar la aumentación de una segunda señal de GPS, L5 centrada en  $f_{L5} = 1176,45 \text{ MHz}$ , además de continuar soportando la señal L1 que se emplea actualmente. También soportará las nuevas señales de Galileo, E1 centrada en  $f_{E1} = 1575,42 \text{ MHz}$  y E5a centrada en  $f_{E5a} = 1176,45 \text{ MHz}$ . Sin embargo, las señales del sistema GLONASS no van a ser integradas en esta nueva versión de EGNOS. El sistema se enfocará también en aumentar su robustez para hacer frente al incremento previsto en los próximos años en el número de

usuarios en todos los ámbitos (aéreo, marítimo y terrestre). Para ello, también se ha apostado por ampliar el segmento espacial, por lo que se ha incorporado recientemente un nuevo satélite a la constelación de EGNOS, el EUTELSAT 5 West B, que prestará servicio en las nuevas bandas de comunicación.

Según [7] la nueva generación de EGNOS V3 tiene previsto ofrecer el servicio marítimo equivalente al que se da actualmente al sector de aviación, conocido como SoL (*Safety of Life*) Aviation, denominándolo SoL Maritime. Es conveniente remarcar que EGNOS V3 se va a desplegar en dos versiones. La primera se denominará EGNOS V3.1, y ofrecerá los mismos servicios que se dan hoy en día, es decir, aumentación de las señales GPS. La segunda versión, EGNOS V3.2, aumentará GPS y Galileo y permitirá emplear doble frecuencia. Con la última versión de EGNOS V3.2 se tiene previsto aumentar la disponibilidad del servicio, así como ofrecerlo a un área más extensa de Europa. También se ofrecerá un nuevo servicio al sector aviación, denominado *Cat-I Autoland*, y se ofrecerán servicios al sector marítimo empleando multiconstelación y multifrecuencia que permita usar EGNOS en aproximaciones a puertos y navegación próxima a costas. La navegación en puertos todavía quedaría limitada, ya que las precisiones exigidas para este servicio todavía no son alcanzables, como se verá en apartados posteriores.

Por último, EGNOS V3.2 va a desplegar cinco nuevas estaciones en el Norte de África, Ucrania y Azerbaijan. Gracias al crecimiento en su segmento terrestre y espacial, va a permitir utilizar el servicio LPV-200 en el Norte de África y en Europa del Este, extendiendo su cobertura para el uso de una única frecuencia GPS L1.

### 3. Performance GNSS. Parámetros Fundamentales

Como se ha ido desarrollando a lo largo del documento, los sistemas de navegación por GPS actuales permiten resolver la posición de un receptor con una precisión suficiente en algunas aplicaciones. Sin embargo, existen ámbitos en los que los requisitos operacionales exigen unas prestaciones mucho más estrictas, como son la navegación aérea o marítima. En estos sectores, la información de posicionamiento debe estar disponible, suministrarse de manera continuada y debe proporcionar unos criterios de fiabilidad adecuados. Por todo esto, surgen una serie de conceptos que permiten evaluar los requisitos operacionales de los sistemas GNSS. Los cuatro parámetros más importantes para analizarlos son la integridad, la precisión, la disponibilidad y la continuidad, los cuales permiten ampliar la información de los sistemas GNSS evaluándonos de una manera mucho más minuciosa. Estos parámetros, han sido estrictamente formalizados en el mundo de la aviación y se han basado en análisis de riesgos, considerando los tiempos críticos de exposición a estos. No obstante, los requisitos de usuario GNSS en el sector marítimo no están todavía claros hoy en día.

A raíz de esto aparecen los sistemas de aumentación por satélite, los cuales proporcionar una serie de datos complementarios al proceso habitual de posicionamiento GPS. Tales datos pueden estar asociados a las fuentes de error del satélite (desviaciones en los relojes, en las efemérides o asociados con la propagación ionosférica), pueden informar sobre el grado en el que está acotada la desviación de la señal de posicionamiento respecto a la posición real o pueden aportar información para resolver las ecuaciones de posición de una manera más precisa.

En este capítulo, se van a desarrollar los conceptos principales con los que se definen los requisitos operacionales de GNSS y que están relacionados de manera estrecha con los sistemas de aumentación. Se va a poner especial atención en definir el concepto de integridad, puesto que será el motivo central de estudio de los capítulos posteriores, y en como los requisitos asociados a este concepto en el sector marítimo se pueden alcanzar haciendo uso de las prestaciones ofrecidas por el sistema EGNOS.

### 3.1. Integridad

La integridad es la medida de la confianza que se puede depositar en la exactitud de la información suministrada por un determinado sistema. Así mismo, la integridad incluye la capacidad del sistema para proporcionar advertencias puntuales y adecuadas al usuario (también conocidas como alertas) cuando el sistema no debe emplearse para el funcionamiento previsto.

El servicio de integridad de los sistemas GNSS que actualmente cumplen con las normas establecidas por la ICAO se proporciona mediante tres sistemas de aumentación normalizados. Estos sistemas son ABAS (*Airborne Based Augmentation System*), GBAS (*Ground Based Augmentation System*) y SBAS (*Satellite Based Augmentation System*). Este último es el objeto de estudio de este trabajo y como se ha explicado en capítulos anteriores, hay varios sistemas SBAS desplegados en todo el mundo. EGNOS es el sistema europeo y en el que se centra el trabajo aquí desarrollado. El concepto de integridad de EGNOS se basa en el uso de una red de estaciones de referencia terrestres que reciben datos de los satélites GPS y calculan datos de integridad y corrección. Esta información se carga en los satélites geostacionarios de EGNOS, que a su vez la transmiten a los receptores de usuarios compatibles a través del EGNOS SIS. Los receptores de EGNOS adquieren y aplican estos datos para determinar la integridad y mejorar la precisión de la solución de navegación procesada. Por lo tanto, el servicio de integridad de SBAS debería proteger al usuario de:

- Fallos en los satélites GPS (que envíen información sesgada de los pseudorangos) mediante la detección y exclusión de los satélites que proporcionen información errónea, a través de la medición de las señales GPS mediante la red de estaciones terrestres de referencia.
- Transmisión de correcciones diferenciales erróneas o inexactas. Estas correcciones erróneas pueden a su vez ser inducidas por cualquiera de las dos siguientes causas:
  - Fallos no detectados en el segmento terrestre.
  - Procesamiento de datos de referencia corruptos por el ruido inducido en el proceso de medida y aplicación del algoritmo.

#### 3.1.1. Conceptos y parámetros de integridad

El segmento terrestre de EGNOS, empleando las medidas tomadas desde la observación de la constelación de GPS a través de la red de estaciones de



referencia, proporciona correcciones y límites de error sobre las efemérides del satélite, sobre los errores de reloj y sobre los errores ionosféricos.

El concepto de integridad de los sistemas SBAS se basa en las siguientes definiciones:

- Riesgo de Integridad (IR) – se define como la probabilidad de que el error de posición sea mayor que el límite de alerta definido para la aplicación prevista del usuario y que este no sea advertido dentro del tiempo de alerta o TTA (*Time to Alert*).
- Evento de Integridad (IE) – ocurre cuando el error en el sistema de navegación es mayor o igual al nivel de protección fijado y el receptor no transmite una alerta dentro del tiempo de alerta o TTA.
- Límite de Alerta (AL) – se define como la tolerancia de error que no debe superarse sin emitir una alerta. Existe un Límite de Alerta Horizontal (HAL), y un Límite de Alerta Vertical (VAL) para cada tipo de operación. Las operaciones supeditadas al servicio EGNOS tienen unos requerimientos diferentes y cada uno predefine unos valores de HAL y VAL.
- Niveles de Protección (PL):
  - HPL – el nivel de protección horizontal o HPL es el radio de un círculo en el plano horizontal, con su centro en la posición real, el cual describe la región que asegura que contiene la posición horizontal indicada.
  - VPL – el nivel de protección vertical o VPL es la mitad de la longitud de un segmento en el eje vertical, con su centro en la posición real, el cual describe la región que asegura que contiene la posición vertical indicada.

En otras palabras, HPL limita el error de posición horizontal con un nivel de confianza derivado del requisito de riesgo de integridad. De manera similar, VPL limita el error de posición vertical. Si el sistema supera el nivel de protección PL, el sistema debería deshabilitarse ya que la información dejaría de ser fiable.

- Tiempo de Alerta (TTA) – se define como el máximo tiempo permitido que puede transcurrir desde que el sistema de navegación está fuera de tolerancia hasta que el equipo de usuario recibe la alerta.

- Fuera de Tolerancia – la condición de fuera de tolerancia se define como un error horizontal que excede el HPL o un error vertical que excede el VPL.
  - El error de posición se denomina como PE (*Position Error*).
  - El error horizontal se denomina como HPE (*Horizontal Position Error*).
  - El error vertical se denomina como VPE (*Vertical Position Error*).

Con todo esto, se considera que ocurre un evento fuera de tolerancia cuando se produce uno de los siguientes eventos:

- $HPE > HPL$  (en valor absoluto)
- $VPE > VPL$  (en valor abosluto)

El concepto de integridad de EGNOS puede resumirse de la siguiente manera, desde el punto de vista del usuario:

- El usuario calcula la solución de navegación y sus niveles de protección asociados. Los niveles de protección deben entenderse como una estimación conservadora del error de posición del usuario, que se asume habitualmente como una función gaussiana. Puesto que el usuario es incapaz de medir el error de posición real, éste se basará en el límite superior del error real para evaluar la integridad del sistema.
- Posteriormente, los niveles de protección calculados se comparan con los límites de alerta definidos para la operación prevista, y si los niveles de protección son mayores que los límites de alerta correspondientes, el sistema no estará disponible puesto que el nivel de rendimiento o *performance* ofrecido por el sistema en ese momento no es suficiente para garantizar la seguridad de la operación prevista.
- Por el contrario, si los niveles de protección calculados son menores que los límites de alerta definidos para la operación prevista, el sistema se declara disponible ya que la seguridad de la operación está garantizada.

La figura 4 intenta clarificar los conceptos presentados, así como su interpretación física. La figura muestra las diferentes situaciones que puede experimentar un usuario de un sistema SBAS; en este caso, se representa el plano horizontal solamente puesto que en posteriores capítulos será el único relevante en el ámbito marítimo, reservando el plano vertical para el sector de aviación. Se debe tener en cuenta que las dos primeras situaciones mostradas el sistema opera

correctamente ya que  $HPE < HPL$  por lo que la seguridad del usuario estaría garantizada. En la tercera situación, el error no está limitado correctamente por EGNOS ya que  $HPE > HPL$ , por lo que aparecerían problemas de seguridad si el error es mayor que los límites de alerta definidos para la operación prevista.

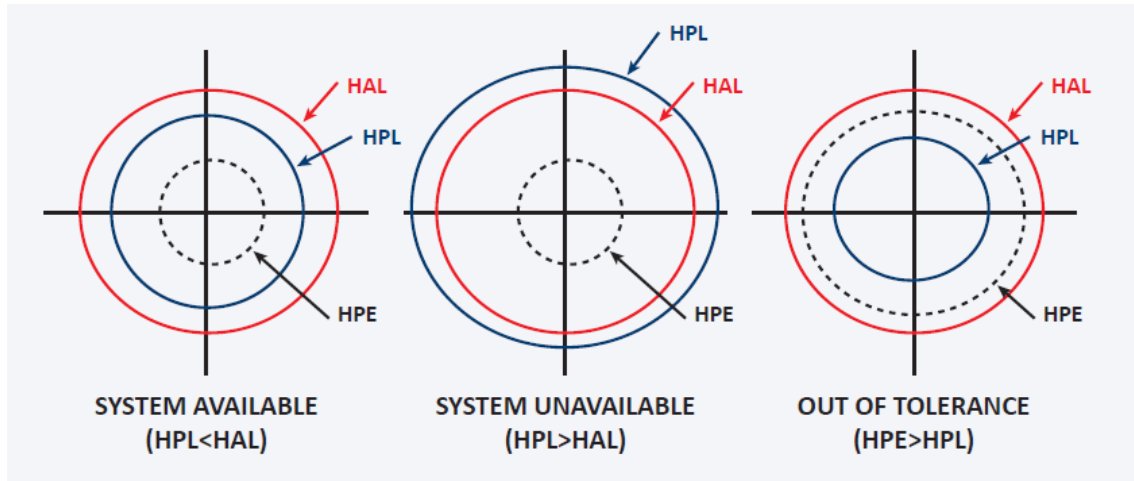


Figura 4. Situaciones posibles de navegación en Plano Horizontal con el sistema EGNOS [6]

### 3.1.2. Medición de integridad

El método empleado habitualmente para medir la integridad se basa en la siguiente herramienta, denominada como Diagrama de Stanford [8]. En la figura 5 se representa esta herramienta que permite analizar la integridad de un sistema.

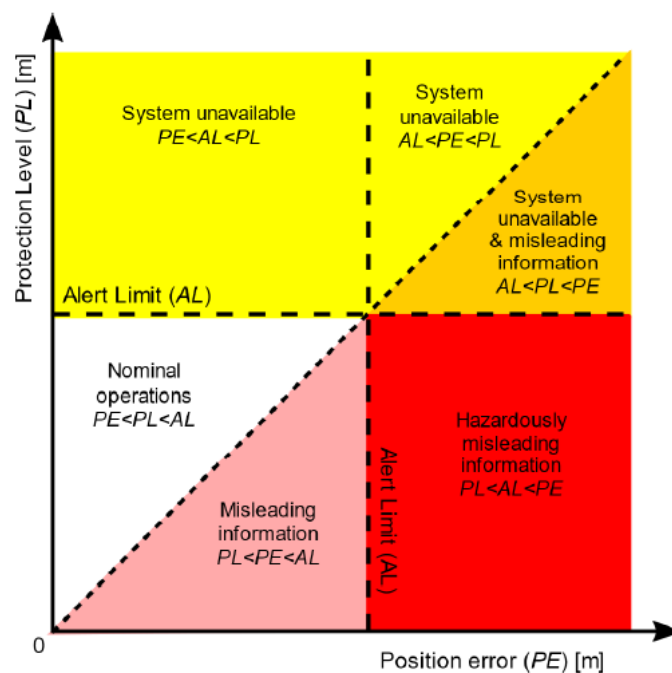


Figura 5. Diagrama de Stanford [8]

Mediante este diagrama se pueden ilustrar de forma simple, los conceptos introducidos en el apartado anterior. La manera de proceder consiste en graficar para cada dato de posición obtenido, su error de posición en el eje de abscisas (PE) así como el nivel de protección asociado en el eje de ordenadas (PL). La línea diagonal establece la frontera de los puntos sobre el que el nivel de protección supera el error de posición definido (cuadrante superior), y aquellos otros sobre los que el error de posición supera al nivel de protección (cuadrante inferior). Así se puede evaluar rápidamente la integridad de la información recibida por un usuario, concluyendo que los puntos que se ubiquen en el cuadrante superior de la diagonal asegurarán una información de posicionamiento correcta, mientras que los puntos que se sitúen cercanos a la propia diagonal implicarán eventos de integridad cercanos a haberse producido, pero que no llegaron a ocurrir.

El Diagrama de Stanford presenta seis zonas claramente diferenciadas. Por encima de la diagonal, existen tres zonas en las que el sistema dispone de un nivel de protección mayor que el error de posicionamiento. Cuando, además, se da la condición de que ambos parámetros son menores que el límite de alerta (AL), se tiene que:

$$PE < PL < AL$$

Así, el sistema estará funcionando en su zona de operación nominal, por lo que no se reportarán alarmas por situación anómala; sin embargo, cuando el nivel de protección es mayor que el límite de alerta ocurre que:

$$PE < AL < PL \text{ o } AL < PE < PL$$

Por tanto, el sistema estará no disponible, ya que no será capaz de ofrecer garantías de fiabilidad para la operación establecida, reportando una alarma para que el sistema no utilice la información.

Por debajo de la diagonal, existen otras tres zonas en las que el sistema tiene un error de posicionamiento superior al nivel de protección establecido, con lo que la información no debe ser empleada. Cuando el nivel de protección y el error de posición son menores que el tiempo de alerta, se tiene que:

$$PL < PE < AL$$

De este modo, el sistema proporcionará información errónea y trabajará en estado de operación erróneo (MI - *misleading information*). Si ambos parámetros son mayores que el límite de alerta ocurre que:

$$AL < PL < PE$$

El sistema estará no disponible, puesto que el nivel de protección será mayor que el límite de alerta, y por tanto, la información recibida no será adecuada.

Por último, si ocurre que el nivel de protección es menor que el límite de alerta, siendo ambos menores que el error de posición:

$$PL < AL < PE$$

El sistema estará operando de manera peligrosa (HMI – *Hazarously Misleading Information*) ya que el error es mayor que el límite de alerta y la información se presenta como fiable.

### 3.2. Precisión

La precisión se define como la diferencia estadística entre la medida de rango llevada a cabo por el usuario y la distancia teórica entre la verdadera posición del satélite y la verdadera posición del usuario. Debido a que este parámetro es de naturaleza estadística, debe presentarse en términos estadísticos como la probabilidad de que el error cometido no sea mayor a un umbral con un determinado de grado probabilidad. Algunos de los métodos más habituales de expresar la precisión son:

- Percentil  $x$  ( $x\%$ ) – referido a que el  $x\%$  de todas las posiciones calculadas presentarán un error menor o igual al valor de precisión fijado.
- Valor Cuadrático Medio (rms) – expresado matemáticamente como la raíz cuadrada de la media del error elevado al cuadrado. Proporciona el valor medio de los errores, modelando estos mediante una distribución normal.
- $x$  sigma ( $x\sigma$ ) – cada unidad sigma se corresponde con una unidad de desviación estándar.

### 3.3. Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema de navegación está definida como el porcentaje temporal durante el que los servicios ofrecidos por el sistema se encuentran disponibles y son utilizables por el usuario [9]. Este parámetro mide de manera

indirecta la capacidad del sistema de prestar sus servicios en la zona de cobertura fijada. De igual manera que se habla de disponibilidad del sistema, se puede hablar de disponibilidad de la señal, siendo este concepto el porcentaje temporal durante el cual la señal transmitida puede ser empleada por el usuario. La disponibilidad del sistema se ve afectada por diversas condiciones, como son el entorno de operación habitual, la capacidad de transmisión del sistema o agentes externos que puedan interferir en su uso.

La disponibilidad de un sistema, como se ha expuesto anteriormente, suele venir expresada en términos de porcentaje. No obstante, el concepto también puede entenderse desde el punto de vista de emplear la señal procedente desde un único satélite, o desde la posibilidad de resolver la posición del receptor de un usuario mediante la constelación satelital completa.

Considerando el caso de recibir únicamente la señal procedente de un único satélite, la disponibilidad del sistema reside totalmente en la disponibilidad del satélite. Esto solamente podrá asegurar conocer el pseudorango del satélite, pero no se podrá resolver la posición del usuario puesto que como es conocido hacen falta un mínimo de tres satélites visibles para poder resolver la posición. También entran en juego restricciones, como por ejemplo la relacionada con que la determinación de la posición se obtenga con un error menor al determinado por un umbral. Si esto no se puede asegurar, la señal del sistema estará disponible pero no así la información necesaria, considerando entonces un sistema que no está disponible, a menos de que cuente con requisitos de integridad. Con todo esto, se puede concluir que la disponibilidad del sistema depende de a que esté referida, además de verse afectada por diversos elementos como son el estado de la constelación, la disposición del entorno de trabajo, la visibilidad del receptor, efectos atmosféricos y multicamino, etc.

Con respecto a la normativa marítima que se va a estudiar en el siguiente capítulo, la disponibilidad del sistema aparece expresada en porcentaje, referido a un número total de días sobre los que se estudia si el sistema está disponible.

### **3.4. Continuidad**

La continuidad de un sistema de navegación se define mediante la probabilidad de que, asumiendo un receptor libre de fallos, un usuario sea capaz de determinar su posición con una precisión especificada y sea capaz de monitorizar la integridad de la posición determinada durante un corto intervalo de tiempo

aplicable a una operación concreta y dentro de una zona de cobertura con un área limitada [9].

Para estimar la continuidad de un sistema, pueden emplearse dos medidas temporales: probabilidad de que el sistema cumpla los criterios de continuidad en un periodo temporal de una hora (expresado en %/h), o en un periodo temporal de quince segundos (%/15s). Estas son las medidas de continuidad habituales en aviación; sin embargo, en el sector marítimo se suele emplear el término de Intervalo de Tiempo de Continuidad o CTI (*Continuity Time Interval*) y viene fijado por un periodo temporal de quince minutos.

Tal y como aparece recogido en [10], existen diferentes tipos de fallos, los cuales tienen un impacto diferente sobre la continuidad del sistema:

- *Hard Failures* – entendidos como fallos graves que resultan en un cese de la transmisión de las señales GNSS, ya sea de manera gradual o repentina. Este tipo de fallos se subdividen en dos categorías como fallos a largo plazo (LT) y fallos a corto plazo (ST). Los fallos LT son aquellos en los que se hace irrecuperable la transmisión de las señales GNSS, mientras que los fallos ST consisten en una pérdida temporal de las señales. La manera habitual de solventar los segundos consiste en emplear la redundancia de sistemas y conmutar de satélite rápidamente.
- *Wear-Out Failures* – los satélites también están sometidos a fallos de desgaste. Estos fallos se diferencian de los fallos graves principalmente en que son predecibles y suelen ocurrir cuando los satélites se encuentran operando al final de su vida útil. Un fallo habitual de este tipo es el derivado de la reducción gradual de energía eléctrica a bordo. Habitualmente cuando se llega a este punto, desde el segmento de control se deshabilitan diversos transpondedores para evitar que los transmisores de RF consuman la poca energía eléctrica que le queda al satélite. Es extremadamente improbable que el segmento terreno no pueda predecir una interrupción en la continuidad derivado de un fallo por desgaste.
- *Soft Failures* – los conocidos como fallos leves se caracterizan por que a pesar de que ocurran, no constituyen una pérdida de continuidad. La señal continuará disponible, a pesar de ser fallos impredecibles y que generan fallos de integridad. Algunos de estos fallos pueden llegar a ser detectados por el propio satélite, el cual puede anticiparse y transmitir una alerta de fallo que inutilice la señal de navegación del propio satélite. De igual manera, el segmento de control también puede detectar este tipo de fallos, anulando la señal y evitando una pérdida de continuidad.

- *Satellite O&M Activities* – consisten en las operaciones de mantenimiento realizadas en los satélites por el segmento de control. Este tipo de operaciones puede generar fuentes de error en los receptores a causa de actualizaciones en los relojes del satélite o en ajustes de la maniobra de posicionamiento. Resultan en información errónea que implica fallos de integridad. Este tipo de fallos, suelen estar planeados por el segmento terrestre por lo que se pueden lanzar alertas para informar a los usuarios de que el satélite no está operativo durante el tiempo que duren las operaciones. Esto garantiza la integridad del sistema y la continuidad del mismo, pudiendo ponerlas en riesgo si no se informa adecuadamente sobre el proceso de operaciones de mantenimiento.



## 4. Sector Marítimo. Legislación y Regulación Vigente en Materia de Integridad

### 4.1. Evolución del concepto de integridad

El concepto de integridad en sistemas GNSS fue formalizado por primera vez en el sector de la aviación. Dicho concepto surgió posteriormente al desarrollo del sistema de aumentación WAAS en el año 1994, así como los términos asociados de precisión, continuidad y disponibilidad. Al comienzo del proceso de definición del concepto de integridad y los conceptos asociados, hubo una amplia colaboración entre los dos principales organismos que regulan la materia en el sector de la aviación y en el sector marítimo. Estos organismos, como ya se ha presentado anteriormente son la ICAO y la IMO.

En el año 2001 la ICAO desarrolló las primeras normas y prácticas recomendadas para aviación bajo el nombre de SARPS (*Standards and Recommended Practices*), las cuales evolucionaron posteriormente para incluir la monitorización de la integridad mediante los sistemas SBAS. En paralelo, la IMO elaboró los requisitos y políticas marítimas para un futuro sistema GNSS; sin embargo, estos requisitos nunca evolucionaron a unas normas de obligatorias que definieran propiamente las características necesarias de rendimiento o *performance* de GNSS. La evolución de los requisitos de integridad en sistemas GNSS elaborados por la IMO serán presentados en las siguientes secciones. En esencia, existen dos resoluciones principales de las cuales se debe partir para analizar los requisitos de integridad definidos por la IMO, que son la Resolución A.1046(27) y la Resolución A.915(22).

A su vez la Resolución A.915(22) [11] – *Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS)* – define la monitorización de la integridad como el proceso que determina si el rendimiento del sistema permite el uso del mismo con propósitos de navegación. En general, la integridad de los sistemas GNSS se definen en esta resolución mediante tres conceptos:

- Límite de Alarma o AL – definido como el máximo error permitido en la posición bajo medida (durante la monitorización de la integridad) antes de que se dispare una alarma.
- Tiempo de Alarma o TTA – definido como el tiempo transcurrido entre un evento de fallo en el sistema y su aparición en el sistema de presentación.

- Riesgo de Integridad o IR – definido como la probabilidad que existe de que un usuario experimente un error de posición mayor a AL sin que se emita la correspondiente alarma dentro del TTA especificado en cualquier instante de tiempo y en cualquier posición del área de cobertura.

Así mismo, la Resolución A.915(22) también define otra serie de conceptos relacionados con la integridad que conviene presentar:

- Integridad – capacidad de proporcionar a los usuarios advertencias dentro de un tiempo específico cuando el sistema no debe ser usado para navegación.
- *Craft Autonomous Integrity Monitoring (CAIM)* – se define como la técnica mediante la cual se procesa de forma autónoma la información del conjunto de sensores de navegación disponibles en la embarcación, para monitorear la integridad de las señales de navegación.
- *Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)* – se define como la técnica mediante la cual la información redundante disponible en un receptor de GNSS, se procesa de forma autónoma para supervisar la integridad de las señales de navegación.
- Continuidad – probabilidad de que, suponiendo un receptor libre de fallos, un usuario sea capaz de determinar su posición con una precisión específica y pueda supervisar la integridad de la posición durante el intervalo de tiempo aplicable a una operación concreta dentro de una zona limitada del área de cobertura.
- Cobertura – la cobertura proporcionada por un sistema de radionavegación es la superficie o el volumen espacial en el que las señales son adecuadas para permitir al usuario determinar la posición con un nivel de rendimiento específico.
- Latencia – tiempo que transcurre entre las observaciones de navegación y la solución de navegación obtenida.
- *Char Error (CE)* – errores de posicionamiento en la carta de navegación causados por inexactitudes topográficas y por errores en el sistema geodésico de referencia.
- *Navigation System Error (NSE)* – error combinado de la estimación de la posición (*Position Estimate* o PE) del GNSS, generalmente referido a un

punto de referencia común y consistente (*Common Consistent Reference Point* o CCRP) y a CE:

$$NSE = CE + PE \quad (12)$$

- *Vessel Technical Error* (VTE) – definido como la diferencia entre la posición indicada de la embarcación y la posición deseada. Es una medida de la precisión con la que la embarcación es controlada. Las componentes de este error son el *Cross Track Error* (XTE) y el *Along Track Error* (ATE).
- *Total System Error* (TSE) – el rendimiento global del sistema de navegación se describe mediante el TSE. Asumiendo que las contribuciones de NSE y VTE son de naturaleza aleatoria, el TSE puede expresarse matemáticamente como:

$$TSE^2 = NSE^2 + VTE^2 \quad (13)$$

- *Fiabilidad de posicionamiento fijo* – es una medida de la propagación de un error grave no detectado en una observación de la posición fija. Esta fiabilidad se suele expresar en términos de error marginalmente detectable. La interpretación geométrica de la ecuación 13 se representa en la figura 6:

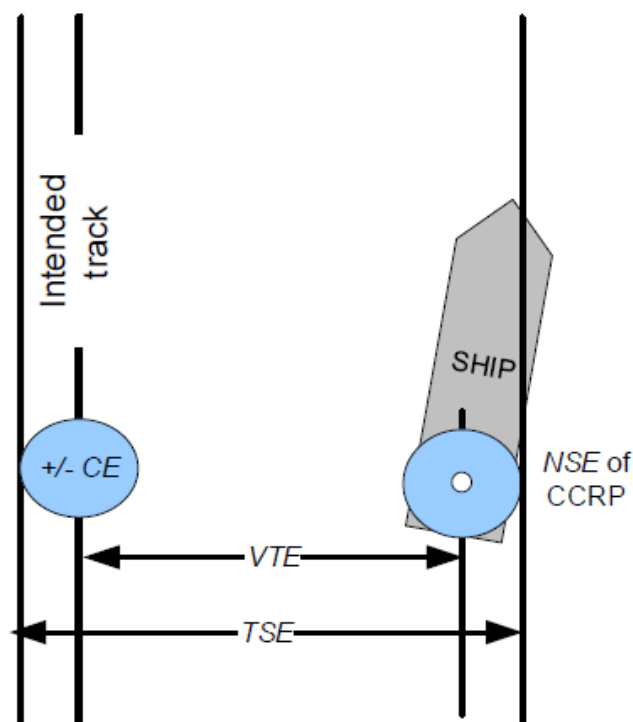


Figura 6. Contribución de NSE (error del sistema de navegación), CE (error en la carta) y VTE (error técnico de la embarcación) al TSE (error total del sistema)

[8]

## 4.2. Resolución A.1046 (27)

Las especificaciones de rendimiento o *performance* para los actuales receptores GNSS embarcados en buques se rigen por la Resolución A.1046(27) de la IMO sobre el Sistema Mundial de Radionavegación (WWRNS).

Se trata de especificaciones a nivel de sistema que no consideran las amenazas que pueden afectar al posicionamiento GNSS a nivel local de usuario. Estas amenazas pueden ser desde disponer de un número reducido de satélites a la vista, el multitrayecto de la señal o hasta las interferencias electromagnéticas (intencionadas o no). Además, en el receptor del usuario tampoco se requiere que implemente sus propios algoritmos de integridad. Con todo esto, los requisitos definidos en la Resolución A.1046(27) estipulan lo siguiente [12]:

- Para navegación en aguas oceánicas:
  - El sistema de radionavegación deber proporcionar información de posicionamiento con un error nunca mayor de 100 metros con una probabilidad del 95%.
  - La tasa de actualización de los datos de posición calculados no debe ser menor a una vez cada 2 segundos.
  - La disponibilidad de la señal debe ser superior al 99,8%. No hay requisitos sobre disponibilidad del sistema.
  - Los avisos de integridad por malfuncionamiento del sistema, no disponibilidad o discontinuidad del servicio, deben ser proporcionados a los usuarios tan pronto como sea factible por los sistemas de Información de Seguridad Marítima (MSI).
- Para navegación en entradas a puertos, aproximaciones a puertos y aguas costeras:
  - El sistema de radionavegación deber proporcionar información de posicionamiento con un error nunca mayor a 10 metros con una probabilidad del 95%.
  - La tasa de actualización de los datos de posición calculados no debe ser inferior a una vez cada 2 segundos, lo cual aplica a los datos de posicionamiento calculados y representados, pero no aplica a la tasa de actualización de cualquier dato de corrección que pueda seguir siendo válido durante 300 segundos o más.
  - La disponibilidad de la señal debe ser superior al 99,8%. No hay requisitos sobre disponibilidad del sistema.

- Cuando el sistema esté disponible, la continuidad del servicio debe ser del 99,97% durante un periodo de 15 minutos.
- Los avisos de integridad por malfuncionamiento del sistema, no disponibilidad o discontinuidad del servicio, deben ser proporcionados a los usuarios en un margen de 10 segundos.
- El sistema se considerará disponible cuando proporcione un nivel de integridad adecuado para la operación y nivel de exactitud determinados.

La resolución no especifica información relevante sobre parámetros críticos de integridad como son el Límite de Alarma (AL) o el Riesgo de Integridad (IR).

A continuación, en la tabla 3 se resumen las especificaciones de la recomendación, en función del tipo de escenario marítimo:

Tabla 3. Especificaciones de la Resolución A.1046(27)

<b>Requisitos</b>	<b>Aguas Oceánicas</b>	<b>Aguas Costeras, Entrada y Aproximación a Puertos</b>
<i>Error de Precisión</i>	< 100 m con probabilidad del 95%	< 10 m con probabilidad del 95%
<i>Tasa de Actualización</i>	No menor a una vez cada 2 seg	No menor a una vez cada 2 seg
<i>Disponibilidad</i>	99,8%	99,8%
<i>Continuidad</i>	Por definir	≥ 99,97% durante 15 min
<i>Integridad</i>	Tan pronto como sea posible por el MSI	Avisos dentro de un margen de 10 seg

### 4.3. Resolución A.915 (22)

Diez años antes de la adopción de la Resolución A.1046(27) en el año 2011, las políticas GNSS fijadas por la IMO fueron establecidas en la Resolución A.915(22) con el objetivo de fijar un punto de partida para abordar las futuras exigencias en materia de posicionamiento marítimo vía satélite. Este documento fue adoptado en el año 2001 pero sigue en vigor a día de hoy. Esta resolución proponía por primera vez como recomendación, la monitorización de la integridad tanto de forma interna (a nivel de usuario o buque) como externa (proporcionada por estaciones externas) en el ámbito marítimo. La resolución, establece una serie de recomendaciones que se exponen a continuación:

- El sistema de radionavegación debe proporcionar una precisión de 10 metros con una probabilidad del 95%.

- Se debe proporcionar un límite de alerta de 25 metros para la mayoría de aplicaciones.
- El tiempo de alarma (TTA) debe ser de 10 segundos.
- El riesgo de integridad (IR) debe ser de  $10^{-5}$  por cada 3 horas.
- Cuando el sistema esté disponible, la continuidad del servicio debe ser del 99,97% durante un periodo de 3 horas.
- La disponibilidad de la señal debe ser superior al 99,8%, considerando un periodo de 30 días.

La Resolución A.915(22) ha sido puesta en duda debido a que establece un intervalo de operación de 3 horas. En comparación con el intervalo fijado en aviación de 15 minutos, este es demasiado elevado (12 veces más). Un intervalo de operación tan elevado no representa adecuadamente la relación entre el riesgo y el rendimiento del sistema GNSS en el sector marítimo. Las críticas emergentes respecto a tiempos mucho menos exigentes para la continuidad y el riesgo de integridad en aviación supusieron que se adoptara un nuevo intervalo de 15 minutos, como se refleja en la Resolución A.1046(27).

A continuación, en la tabla 4 se resumen las especificaciones de la recomendación, en función del tipo de escenario marítimo:

Tabla 4. Especificaciones de la Resolución A.915(22)

Requisitos Sector Marítimo	Aguas Oceánicas	Aguas Costeras	Aproximación a Puertos y Aguas Restringidas	Navegac. en Puertos	Aguas Continentales	
<b>Parámetros a Nivel de Sistema</b>						
<i>Precisión Horizontal Absoluta</i>	10 m	10 m	10 m	1 m	10 m	
<i>Integridad</i>	<i>AL</i>	25 m	25 m	25 m	2,5 m	25 m
	<i>TTA</i>	10 s	10 s	10 s	10 s	10 s
	<i>IR (3h)</i>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>
<b>Parámetros a Nivel de Servicio</b>						
<i>Disponibilidad % por 30 días</i>	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	
<i>Continuidad % sobre 3 horas</i>	N/A	N/A	99,97	99,97	99,97	
<i>Corbertura</i>	Global	Global	Regional	Local	Regional	

#### 4.4. Comparativa con requisitos del sector aéreo

Como ya ha sido comentado en el documento anteriormente, el concepto de integridad en sistemas GNSS fue definido originalmente en el ámbito de la aviación civil por la ICAO. Es en este ámbito, donde los requisitos y especificaciones para usar sistemas GNSS en tareas de navegación, vigilancia y control de tráfico aéreo han sido definidos meticulosamente.

Los valores de integridad y del resto de parámetros fundamentales en navegación dependen directamente de la fase de vuelo, al igual que ocurre en el sector marítimo en el que se establecen requisitos en base a la zona de navegación. Los sistemas GPS por si solos no son capaces de alcanzar los requisitos fijados por la ICAO, con lo que es necesario emplear sistemas de aumentación como SBAS para lograr satisfacerlos. Es por esto, que la mayoría de sistemas de monitorización de integridad, así como técnicas y algoritmos asociados al tratamiento de esta información, han sido desarrollados para apoyar a las operaciones de la aviación civil dentro de las especificaciones de la ICAO.

En la tabla 5 se recogen los requisitos que la ICAO establece para las diferentes fases de vuelo [13] y [14]. Hay que tener en cuenta, que todos los parámetros en el sector de aviación se fijan en dos dimensiones, es decir, en el plano vertical y

el plano horizontal. Esto difiere del sector marítimo, en que el plano horizontal es el único que tiene sentido definir.

Tabla 5. Requisitos de integridad para las diferentes fases de vuelo en aviación civil

Fase de Vuelo	Precisión		Integridad				
	V	H	AL		TTA	IR	
			V	H			
<i>En route / Terminal</i>	N/A	0,74 – 3,7 km	N/A	1,85 – 7,4 km	5 min – 15 s	$10^{-7}/\text{hr}$	
<i>NPA, Initial-Approach / Departure</i>	N/A	0,22 – 0,74 km	N/A	1,85 – 3,7 km	10 – 15s	$10^{-7}/\text{hr}$	
<i>LNAV / VNAV</i>	20 m	220 m	50 m	556 m	10 s	4-8 x $10^{-6}/15\text{ s}$	
<i>LPV</i>		16 m	40 m	35 m			6 s
<i>APV-I</i>				20 m			
<i>APV-II</i>				8 m	35 m		
<i>LPV 200</i>				4 m	10 m		
<i>Precision Approach CAT I</i>							
<i>Precision Approach CAT II / III</i>	< 2,9 m	< 6,9 m	5,3m	< 17 m	< 2s	< $10^{-9}/150\text{ s}$	

Si se comparan estos requisitos con los que se encuentran en vigor actualmente para el sector marítimo en la regulación A.915(22), de forma general se puede apreciar que los órdenes de magnitud son similares. Es complicado hacer un análisis comparativo, puesto que los escenarios operativos son totalmente diferentes. No obstante, y poniendo especial atención a los escenarios más restrictivos, se puede comprobar que:

- La precisión en puertos en el ámbito marítimo es la que marca el valor más exigente, teniendo en cuenta ambos sectores, al necesitar 1 metro en el plano horizontal.
- Respecto a la integridad, el límite de alarma (AL) también queda fijado como parámetro más restrictivo el que se define para el sector marítimo en entornos de puerto, al necesitar 2,5 metros.
- Para el parámetro TTA, el sector de aviación es más restrictivo que el sector marítimo puesto que fija un valor menor a 2 segundos, en fases de vuelo de *Precision Approach CAT II / III*. En el sector marítimo este



parámetro no es tan restrictivo, exigiendo 10 segundos en cualquier escenario de operación.

- Por último, el parámetro de riesgo de integridad (IR) es el más complicado de comparar, ya que los sectores de aviación y marítimo no emplean el mismo intervalo de tiempo para evaluarlo. Mientras que la IMO fija un intervalo de operación de 3 horas, el tiempo fijado por los estándares de aviación es de 150 segundos, lo que supone un intervalo temporal 72 veces mayor.

## 5. Compatibilidad de EGNOS con los Requisitos de Integridad en Navegación Marítima

Este capítulo va a exponer las prestaciones que el sistema EGNOS es capaz de proporcionar para satisfacer los requisitos de integridad que se han desarrollado en el capítulo anterior para el sector marítimo. Puesto que el sistema EGNOS se encuentra inmerso en su evolución a la versión 3 (V3), tiene sentido enfocarse en las prestaciones que el sistema va a proporcionar con esta nueva actualización. Como se expuso en capítulos anteriores, EGNOS V3 está en pleno desarrollo y entrará en funcionamiento próximamente, por lo que parece sensato revisar las prestaciones que va a proporcionar para satisfacer los requisitos de integridad actuales para navegación marítima. El sistema está evolucionando de manera que pueda ofrecer un servicio dedicado a seguridad en navegación marítima, de manera similar al que se presta para aviación. Este servicio se denominará *Safety-of-Life Maritime*, y la nueva generación de EGNOS lo incluirá teniendo en cuenta sus futuras prestaciones.

Posteriormente, se presenta una reflexión sobre las líneas que se sugiere seguir de ahora en adelante en materia regulatoria para navegación marítima basada en sistemas de aumentación. La normativa actual como se ha visto, no entra en profundidad y en cierto modo puede estar desactualizada, ya que ha pasado bastante tiempo desde su última revisión. Por último, también se desarrollarán una serie de sugerencias sobre el diseño de futuros receptores para barcos, que empleen las radio ayudas basadas en sistemas satélite y SBAS en base a las mejoras que va a incorporar el sistema EGNOS en su V3.

### 5.1. Prestaciones de Integridad del Sistema EGNOS

El sistema EGNOS se encuentra actualmente en desarrollo desde su versión V2 hacia la futura V3, en la que se van a implementar una serie de actualizaciones que van a permitir aumentar las prestaciones del sistema. Entre estas nuevas prestaciones, se encuentran la de proporcionar un servicio más robusto y preciso, así como la incorporar nuevos servicios SoL como el dedicado al sector marítimo. Además, EGNOS V3 incluirá una segunda frecuencia protegida en banda L5 que estará disponible tanto para la constelación de GPS como de Galileo. Entre otras prestaciones, Galileo va a permitir realizar correcciones mucho más precisas

sobre los errores ionosféricos y de reloj, además de proporcionar una nueva constelación de satélites visibles aumentando su cobertura. Además, los sistemas que hayan sido desarrollados y se encuentren en funcionamiento con capacidad de procesar únicamente la frecuencia L1 seguirán en servicio puesto que la retrocompatibilidad está garantizada.

Todas estas mejoras sobre el sistema de aumentación EGNOS, se traducen en unos valores característicos sobre cada uno de los parámetros fundamentales de rendimiento del sistema. Concretamente y como se presenta en la tabla 6, el sistema EGNOS V3 va a ser capaz de proporcionar las siguientes prestaciones [7]:

Tabla 6. Prestaciones de EGNOS V3

<b>Sector Marítimo</b>		<b>GPS L1/L5</b>	<b>GPS + Galileo L1/L5</b>
<i>Servicio</i>		Entrada a Puertos, Aproximación a Puertos y Aguas Costeras	Entrada a Puertos, Aproximación a Puertos y Aguas Costeras
<b>Parámetros a Nivel de Sistema</b>			
<i>Precisión Horizontal</i>		10 m con probabilidad del 95%	10 metros con probabilidad del 95%
<i>Integridad</i>	<i>AL</i>	25 m	25 m
	<i>TTA</i>	5,2 seg	5,2 seg
	<i>IR (150s)</i>	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
<b>Parámetros a Nivel de Servicio</b>			
<i>Riesgo de Continuidad (sobre 3 horas)</i>		$10^{-5}$	$10^{-5}$
<i>Disponibilidad</i>		99,8 %	99,8 %
<i>Cobertura</i>		Aguas Nacionales de EU28 + Suiza + Noruega	Aguas Nacionales de EU28 + Suiza + Noruega

Los servicios más críticos definidos y que se encontrarán disponibles están referidos a entrada en puertos, aproximación a puertos y navegación en aguas costeras. Los escenarios de navegación en puertos no están contemplados todavía en EGNOS V3. Estos escenarios son los más exigentes en cuanto a parámetros fijados por normativa, y como se verá en el siguiente punto, todavía no se puede asegurar el cumplimiento de la integridad.

Respecto a la cobertura del sistema, en las aguas nacionales de la zona EU28 se incluyen los siguientes países de la Unión Europea: Bélgica, Bulgaria, República Checa, Dinamarca, Alemania, Estonia, Irlanda, Grecia, España, Francia, Croacia, Italia, Chipre, Lituania, Letonia, Luxemburgo, Hungría, Malta, Países Bajos, Austria, Polonia, Portugal, Rumania, Eslovenia, Eslovaquia, Finlandia, Suecia y Reino Unido. Por tanto, prácticamente toda Europa se va a poder beneficiar de las prestaciones ofrecidas por EGNOS V3 en materia de ayudas a navegación (tanto aérea como marítima).

## 5.2. Comparativa de Requisitos Marítimos y Prestaciones de EGNOS V3

Una vez presentados los requisitos fijados por las resoluciones vigentes en materia de integridad para radionavegación marítima con sistemas SBAS, es necesario estudiar si esos requisitos se pueden satisfacer con las prestaciones ofrecidas por el futuro sistema EGNOS V3. La tabla 7 recoge la comparativa de los parámetros de integridad y rendimiento en el sector marítimo, así como las conclusiones sobre si a día de hoy se pueden satisfacer con el sistema EGNOS V3.

Se han diferenciado tres escenarios operativos de acuerdo a lo establecido en las resoluciones del capítulo anterior, los cuales definen unos parámetros de integridad diferentes. Para cada uno de los escenarios, se han comparado sus requisitos con las prestaciones del sistema EGNOS, con el fin de estudiar si pueden cumplirse. Así, se tienen los tres escenarios que se explican a continuación:

- **Aguas Oceánicas** – es uno de los escenarios menos exigentes en cuanto a parámetros de integridad se refiere. Tanto la precisión como los parámetros de integridad requeridos pueden ser resueltos por el sistema EGNOS V3. Sin embargo, existen dos parámetros que se asumen aceptados pero que no se pueden verificar por completo a día de hoy:
  - El primero de ellos es la continuidad, puesto que no hay establecido ningún valor en las resoluciones vigentes en materia de navegación marítima para sistemas SBAS. No obstante, con las prestaciones que ofrece el sistema EGNOS debería ser suficiente para asegurar un correcto servicio en este escenario.
  - El segundo parámetro en duda se asocia a la cobertura del sistema, puesto que las aguas oceánicas son de carácter global y el sistema EGNOS como ya se ha expuesto a lo largo del trabajo, sólo ofrece cobertura en Europa y Norte de África. No obstante, este problema

debería ser considerado, a pesar de que existan soluciones como la de emplear otros sistemas de aumentación como los que se expusieron en capítulos anteriores y que son capaces de ofrecer cobertura en otras zonas.

- Por último, el IR está definido en un intervalo temporal diferente. Como ya se comentó, las resoluciones vigentes establecen un periodo de 3 horas, mientras que EGNOS cuantifica este parámetro considerando 150 segundos.
- **Aproximación y Entrada a Puertos, y Aguas Costeras** – este escenario define unos requisitos más exigentes que el anterior; sin embargo, las capacidades del sistema EGNOS serán capaces de asumirlos. Existen dos parámetros sobre los que merece la pena pararse a reflexionar:
  - La continuidad del servicio es un parámetro que no se define de la misma forma en las resoluciones marítimas y en las especificaciones de EGNOS. Mientras que en el primero se define con un porcentaje de continuidad sobre un periodo temporal de 3 horas, en el segundo se presenta como un Riesgo de Continuidad. Se han considerado como positivas las prestaciones de EGNOS para satisfacer este criterio. Sin embargo, se propone a futuro establecer los mismos criterios de evaluación para ambos.
  - Respecto a la cobertura, merece la pena comentar lo mismo que en el escenario de Aguas Oceánicas. Sin embargo, las costas y puertos europeos dispondrán de total cobertura con el sistema EGNOS.
- **Navegación en Puertos** – este es el escenario más complejo y exigente en materia de navegación. EGNOS V3 no está preparado por el momento para cumplir con los requisitos fijados para este escenario, puesto que no es capaz de cumplir con los requisitos de precisión e integridad exigidos.
  - La exigencia de precisión horizontal de 1 metro todavía no es alcanzable con EGNOS V3, por lo que no se podrá utilizar el sistema para este tipo de escenarios.
  - El límite de alarma fijado para este escenario tampoco se puede alcanzar con las prestaciones actuales, ya que EGNOS ofrece un AL de 25 metros, mientras que las resoluciones vigentes lo fijan en 2,5 metros.

Tabla 7. Comparativa de requisitos de integridad para sector marítimo y prestaciones de EGNOS V3

Escenario y Requisitos		Resolución A.1046(27) + A.915(22)	Prestaciones EGNOS V3 (GPS + Galileo L1/L5)	OK / NOK	
Aguas Océánicas	Parámetros a Nivel de Sistema				
	Precisión Horizontal	10 m	10m (95%)	OK	
	Integridad	AL	25 m	25 m	OK
		TTA	10 seg	5,2 seg	OK
		IR (150s)	10 <sup>-5</sup> (sobre 3 horas)	2 x 10 <sup>-7</sup> (150 seg)	OK
	Parámetros a Nivel de Servicio				
	Continuidad (sobre 3 h)	Por definir	10 <sup>-5</sup> (Riesgo de continuidad)	OK	
	Disponibilidad	99,8%	99,8%	OK	
Cobertura	Global	EU28+Suiza+Noruega	OK		
Aproximación y Entrada a Puertos y Aguas Costeras	Parámetros a Nivel de Sistema				
	Precisión Horizontal	10 m	10m (95%)	OK	
	Integridad	AL	25 m	25 m	OK
		TTA	10 seg	5,2 seg	OK
		IR (150s)	10 <sup>-5</sup> (sobre 3 horas)	2 x 10 <sup>-7</sup> (150 seg)	OK
	Parámetros a Nivel de Servicio				
	Continuidad (sobre 3 h)	99,97 % (15 min)	10 <sup>-5</sup> (Riesgo de continuidad)	OK	
	Disponibilidad	99,8%	99,8%	OK	
Cobertura	Global / Regional	EU28+Suiza+Noruega	OK		
Navegación en Puertos	Parámetros a Nivel de Sistema				
	Precisión Horizontal	1 m	No alcanzable	NOK	
	Integridad	AL	2,5 m	No alcanzable	NOK
		TTA	10 seg	5,2 seg	OK
		IR (150s)	10 <sup>-5</sup> (sobre 3 horas)	2 x 10 <sup>-7</sup> (150 seg)	OK
	Parámetros a Nivel de Servicio				
	Continuidad (sobre 3 h)	99,97 %	10 <sup>-5</sup> (Riesgo de continuidad)	OK	
	Disponibilidad	99,8%	99,8%	OK	
Cobertura	Local	Por definir	OK		

Con todo esto, para el sector marítimo se concluye que EGNOS V3 podrá ofrecer todos los servicios en los escenarios operativos establecidos, salvo la navegación en puertos. Asegurar 1 metro de precisión horizontal con una probabilidad de error menor al 95% no es posible hoy en día, aunque depende de la zona y de la cobertura (sí que se puede conseguir esa precisión pero no esa tasa de probabilidad de error). Tampoco es asumible alcanzar un AL de 2,5 metros, por lo que estos parámetros hacen que el sistema todavía no sea adecuado para ser empleado con este propósito en materia de integridad.

El cumplimiento y validación de todos estos requisitos puede conducir a que EGNOS sea reconocido como un componente regional de WWRNS (*World Wide Radio Navigation System*). Además, EGNOS va a mejorar sustancialmente el servicio marítimo actual, pero todavía no podrá satisfacer los requisitos exigidos en todos los escenarios marítimos.

### **5.3. Adecuación y Líneas Futuras en Materia Regulatoria**

Las resoluciones vigentes que establecen los requisitos en materia de navegación marítima con sistemas GNSS, son las definidas por la IMO en la A.1046(27) y A.915(22). Como se ha expuesto en capítulos anteriores, la resolución A.1046(27) está enfocada a los requisitos exigidos por la WWRNS y por tanto, desarrolla requisitos que se centran en el rendimiento del sistema sin considerar los requisitos a nivel de usuario. En esta resolución, un elemento WWRNS puede ser un sistema basado en satélite (GNSS) o basado en elementos terrenos, puesto que no se queda especificado siendo por tanto requisitos genéricos. Por otro lado, la resolución A.915(22) especifica los requisitos para los futuros sistemas GNSS, basando sus parámetros en las recomendaciones empleadas en aviación por la ICAO. De este modo esta resolución se basa en los requisitos de rendimiento a nivel de usuario y no a nivel de sistema.

A pesar de las resoluciones en vigor, los requisitos actuales necesitan consolidarse y revisarse para poderlos actualizar a las necesidades presentes y futuras. Para esta tarea, es necesaria una estrecha cooperación con la comunidad del sector marítimo, ya que son ellos los que conocen las necesidades existentes en radionavegación por satélite. Debería considerarse el hecho de definir una serie de requisitos enfocados directamente a sistemas de navegación basados en satélite, desde GNSS a SBAS, considerando específicamente las prestaciones que estos pueden alcanzar. Algunos de los aspectos que necesitan ser considerados más en detalle son:

- Requisitos de usuario.
- Requisitos de sistema.
- Definición precisa de los escenarios y el concepto operativos subyacente.
- Desarrollo de modelos apropiados para las fuentes locales de error.
- Definición común de parámetros de integridad, estableciendo las bases temporales de estos con la misma referencia.

Se debe considerar de igual manera a la hora de revisar las resoluciones en materia de integridad, las futuras mejoras de los sistemas de aumentación y en concreto de EGNOS en su V3. Las prestaciones que puede llegar a ofrecer de ahora en adelante gracias al empleo de la frecuencia dual (en bandas L1 y L5) y la multi constelación (GPS y Galileo), debe hacer replantear las prestaciones que se le deben exigir.

Tampoco se puede obviar la necesidad de definir una serie de procedimientos y métodos que regulen como se debe monitorizar el rendimiento de integridad durante la navegación, así como su verificación con el grado de conformidad asociado. Si el sistema no debe emplearse debido a su imprecisión, o con otras palabras, si  $HPE > HPL$  (el error de posición horizontal es mayor que el nivel de protección horizontal) o si  $HPL > HAL$  (el nivel de protección horizontal es mayor que el límite de alarma horizontal), el usuario rápidamente debe ser advertido por medio de las correspondientes señales del sistema de alarmas del buque. Esta verificación es uno de los elementos clave de los servicios *Safety-Of-Life* (SoL). Por tanto, todos estos procedimiento de aviso y alarma deberían estar regulados en la normativa de navegación correspondiente. En la figura 7, se representa el concepto de integridad a nivel de usuario y como podría implementarse su monitorización de manera esquemática.

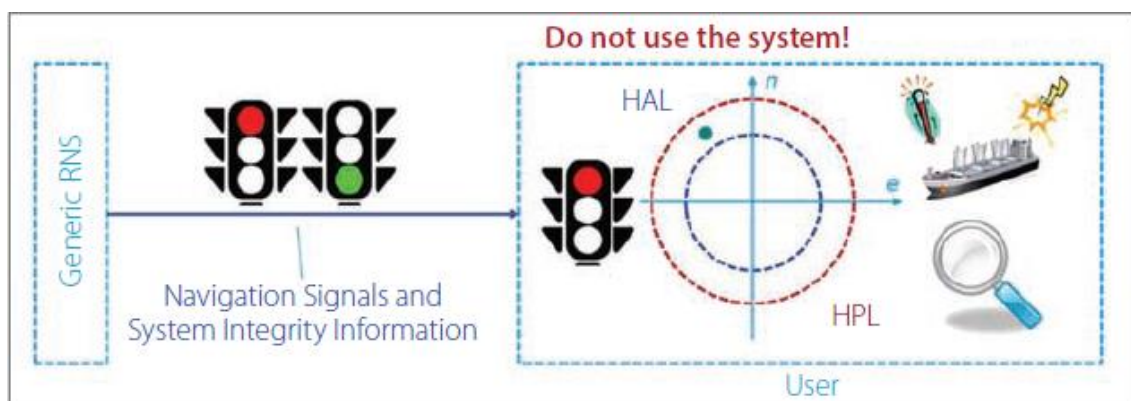


Figura 7. Monitorización de la integridad a nivel de usuario [15]



## 5.4. Consideraciones para el Desarrollo Futuro de Receptores EGNOS para Navegación Marítima

Como se ha presentado a lo largo de los capítulos anteriores, el uso de los sistemas SBAS puede tener claros beneficios en la navegación marítima. De hecho, actualmente la mayoría de los receptores marítimos están preparados para ser compatibles con los sistemas SBAS, incluido EGNOS. El motivo de que no se aprovechen estas prestaciones reside en la falta de claridad del marco regulatorio.

Los mensajes de corrección transmitidos por EGNOS están formados por una serie de mensajes diferentes denominados MT (*Message Type*). Los diferentes MT han sido descritos en capítulos anteriores de este trabajo. Cabe recordar que estos mensajes se transmiten por medio de la señal SiS y transmiten la información con los datos de corrección e integridad. Para que los futuros receptores sean compatibles con los requisitos de rendimiento establecidos en la resolución de la IMO A.1046(27), deberían tener en cuenta una serie de MT. Con esto, un receptor para el ámbito marítimo debería emplear los siguientes mensajes:

- MT 0 – los receptores marítimos deben considerar la información de este mensaje, ya que indica que la información de aumentación transmitida por un satélite no es adecuada para aplicaciones de seguridad. Los receptores deberían considerar que, si reciben el MT 0, se debería cesar automáticamente el uso de la información de aumentación con fines de seguridad.
- MT 1 – los receptores deben interpretar este mensaje para conocer los satélites de la constelación de los que se van a obtener los datos de integridad.
- MT 2 / 3 / 4 / 5 / 24 – todos estos mensajes contienen información de correcciones rápidas de precisión y distancia. Los receptores deben decodificar el UDRE *Indicator* alojado en los mensajes MT 2, MT 3, MT 4, MT 5 y MT 24 para determinar si las correcciones recibidas son adecuadas, si el satélite ha sufrido algún fallo, etc.
- MT 9 – los datos de este mensaje contienen los parámetros de la función de *ranging* e información sobre las efemérides, que también deberán ser consideradas por los receptores.

- MT 17 – este mensaje contiene información sobre los almanaques GEO, los cuales también deben ser considerados por los receptores SBAS.
- MT 24 / 25 – los receptores deben interpretar las correcciones a largo plazo sobre los errores del satélite que se difunden por medio de estos mensajes.
- MT 18 / 26 – para poder decodificar y aplicar las correcciones ionosféricas adecuadas los receptores deben interpretar correctamente el MT 26. Además, mediante el MT 18 los receptores son capaces de conocer el punto geográfico sobre el que se están proporcionando las correcciones ionosféricas para aplicar la máscara adecuada. El campo *GIVE Indicator* alojado en el MT 26 es el que le permite al receptor determinar si la corrección ionosférica proporcionada para el IPP (*Ionospheric Pierce Point*) se puede aplicar.
- El receptor también debería ser capaz de aplicar correcciones troposféricas para corregir los errores asociados y proporcionar una correcta precisión.

Con los datos recibidos por parte de la constelación de EGNOS los receptores marítimos ya podrían resolver la posición con precisión y disponer de los datos de integridad que proporcionen la seguridad necesaria para cumplir con los requisitos de la IMO.

Además, existen una serie de pautas que se recomienda seguir a los fabricantes de receptores marítimos con capacidad de procesar señales de aumentación del sistema EGNOS, de forma que se pueda verificar que el receptor cumple con los requisitos a nivel de sistema, con las características de radiofrecuencia de la señal SiS y que procesa adecuadamente los mensajes SBAS que se han explicado. Puesto que los barcos son elementos que pueden presentar movimientos de diferente naturaleza debido al estado del mar y los escenarios operativos en los que se encuentre (movimientos estáticos, lineales, angulares, de cabeceo, etc.) algunos de los test recomendados a los que se debería someter al receptor serían:

- Prueba de precisión con la antena en movimiento estático.
- Continuidad y disponibilidad con la antena en estático.
- Prueba de precisión en estático con movimiento angular en la antena (simulando el cabeceo y movimiento del barco cuando está varado).
- Continuidad y disponibilidad en estático con movimiento angular de la antena.

- Prueba de precisión dinámica con movimiento angular en la antena. Esta prueba debe reflejar fielmente el movimiento al que está sometida la antena en un buque y por tanto puede ser exigente.
- Continuidad y disponibilidad de la información de aumentación siendo sometida la antena a la prueba anterior.
- Recepción, decodificación y presentación de avisos de navegación e integridad. Se debe probar que cuando la información no es adecuada para ser utilizada, el receptor es capaz de interpretarlo y notificarlo con una serie de avisos y alarmas.
- Pruebas ambientales que sometan al receptor a escenarios atmosféricos marítimos (salinidad, humedad, etc.) y estudiar su influencia en el rendimiento del mismo.

Finalmente, y como suele ocurrir habitualmente, los usuarios de una nueva tecnología pueden mostrarse reticentes a su confiabilidad. Por ello sería muy aconsejable que los receptores puedan trabajar de manera simultánea con los receptores DGNSS que están ampliamente desplegados en la actualidad. Los futuros receptores podrían diseñarse para emplear ambas tecnologías (DGNSS y SBAS/EGNOS) de manera que satisfagan las formas de operar actuales y futuras, facilitando la transición de un sistema a otro para los usuarios del sector marítimo.

## 6. Conclusiones y Líneas Futuras

### 6.1. Conclusiones

De todo lo realizado a lo largo de este trabajo se pueden extraer diversas conclusiones y lecciones aprendidas a partir de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se ha revisado el estado del arte de los sistemas de aumentación por satélite, pudiendo enfocar su funcionamiento desde un punto de vista sistemático que ha permitido comprender la filosofía de trabajo de este tipo de sistemas. También se han presentado unas breves nociones matemáticas sobre su funcionamiento y como efectúa las correcciones para eliminar los errores asociados a los relojes, los errores atmosféricos de la troposfera y la ionosfera, y los errores de posición de los satélites de la constelación.

En segundo lugar, se ha podido estudiar en profundidad el sistema EGNOS, presentando en detalle tanto los servicios que ofrece, como los mensajes que transmite con la información de aumentación e integridad asociada. Asimismo, se ha profundizado en su arquitectura lo que ha permitido asimilar cómo funciona el sistema en su totalidad.

A continuación, se han definido todos los parámetros característicos que permiten caracterizar un sistema de aumentación, los cuales son integridad, precisión, disponibilidad y continuidad. Han sido desarrollados enfocándolos a su aplicación en el sector marítimo. Además, y puesto que la integridad es el parámetro de estudio principal del trabajo, se ha presentado una herramienta conocida como Diagrama de Stanford que permite evaluar la calidad de la integridad de un sistema de aumentación.

Posteriormente se ha revisado la legislación vigente en materia de integridad en el sector marítimo. Se ha podido comprobar que las resoluciones vigentes no están lo suficientemente definidas y que, por tanto, se debe trabajar en estudiar con más detalle los requisitos de integridad de los sistemas de aumentación para el ámbito marítimo (tanto a nivel de sistema como de usuario). Se ha presentado a modo comparativo algunos de los requisitos equivalentes en el sector de aviación, en el que los requisitos están mucho más maduros a consecuencia de emplear este tipo de sistemas desde hace más tiempo. No obstante, existen parámetros que han sido definidos con más criticidad en el sector marítimo y por tanto son más exigentes con el sistema EGNOS que el sector de aviación. Para la

navegación en puertos, la precisión y el límite de alarma (AL) son parámetros todavía inalcanzables con las prestaciones actuales de EGNOS V3.

Como conclusión principal del trabajo, puesto que éste era el objetivo principal, se han presentado las prestaciones del futuro sistema EGNOS V3 y los requisitos en materia de integridad fijados en la actualidad para los diferentes escenarios operativos en el sector marítimo. Una vez comparados ambos, se ha concluido que el sistema EGNOS V3 es capaz de cumplir con los requisitos de integridad en todos los escenarios marítimos salvo en la navegación en puertos. Este escenario todavía tiene unos requisitos demasiado exigentes para poder asegurar su cumplimiento con el sistema EGNOS V3. Tanto para aguas oceánicas, como para navegación costera y aproximación a puertos, las prestaciones de EGNOS son suficientes para asegurar los requisitos de integridad establecidos en las resoluciones de la IMO A.915(22) y A.1046(27).

Consecutivamente, se han hecho unas propuestas sobre las líneas futuras que se deberían abordar en materia regulatoria. Se ha recomendado definir de una manera más clara, las posibles fuentes locales de error y como éstas pueden afectar a la integridad. También se ha observado la necesidad de definir una serie de estándares que establezcan la manera en la que se debe monitorizar la integridad y los parámetros que la caracterizan para ser correctamente interpretada por los usuarios.

Por último, se han establecido una serie de recomendaciones a la hora de diseñar los futuros receptores para el sector marítimo. Se han de tener en cuenta los movimientos a los que se verá sometida la antena a causa de los escenarios operativos en los que se mueven los barcos. Esto puede derivar en una degradación importante en la calidad de la señal recibida, y es algo en lo que deben prestar especial atención los desarrolladores de receptores de sistemas de aumentación por satélite.

## **6.2. Líneas Futuras**

Para continuar con el trabajo desarrollado en este proyecto, sería interesante estudiar como afecta a las prestaciones de integridad el empleo de un sistema DFMC (*Dual Frequency Multi Constellation*) como el que va a implementar EGNOS V3. Se propone llevar a cabo un estudio en el que se comparen las prestaciones del sistema EGNOS actual, con las del sistema EGNOS V3, para analizar en qué medida emplear la doble frecuencia L1/L5 y disponer de los satélites en las constelaciones GPS y Galileo permite alcanzar unas prestaciones mucho más

elevadas de cobertura, integridad y precisión a la hora de posicionar un elemento en el ámbito marítimo.

Otra de las líneas de trabajo futuro que pueden explorarse podría estar relacionada con el diseño de receptores. Se propone definir una serie de pruebas más en detalle a las que se podría someter a los receptores marítimos. Mediante simulación, se podría definir cómo afecta el movimiento de un barco en la mar (cabeceo del buque, movimiento dinámico y aleatorio, etc.) a un sistema receptor de señales SBAS para posicionamiento marítimo. Sería interesante realizar un estudio que proponga como se degrada la señal de aumentación a causa del movimiento del sistema receptor embarcado y sus posibles soluciones.

Por último, sería interesante realizar una propuesta de sistema de monitorización de integridad para barcos. Puesto que este es un ámbito por definir todavía en el ámbito marítimo, se podrían emplear las bases fijadas por la ICAO en el sector aviación para extrapolarlas al sector marítimo. Se podría definir y diseñar un interfaz en el que se reflejasen todos los escenarios posibles que pueden darse a nivel de integridad, y una serie de alarmas que informasen a los usuarios que empleen el sistema de posicionamiento SBAS, cuando la integridad no sea adecuada para emplearlo.

## 7. Glosario

ABAS	<i>Airborne Based Augmentation System</i>
AL	<i>Alert Limit</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility</i>
ATE	<i>Along Track Error</i>
CAIM	<i>Craft Autonomous Integrity Monitoring</i>
CCF	<i>Central Control Facility</i>
CE	<i>Chart Error</i>
CPF	<i>Central Processing Facilities</i>
CTI	<i>Continuity Time Interval</i>
DFMC	<i>Dual Frequency Multi Constellation</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation System</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error</i>
GMS	<i>Ground Monitor Station</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GSA	<i>European Global Navigation Satellite Systems Agency</i>
HAL	<i>Horizontal Alert Limit</i>
HMI	<i>Hazarously Misleading Information</i>
HPE	<i>Horizontal Position Error</i>
HPL	<i>Horizontal Protection Level</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IE	<i>Integrity Event</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
INMCC	<i>Indian Master Control Center</i>
INRES	<i>Indian Reference Stations</i>
IR	<i>Integrity Risk</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
MCC	<i>Mission Control Centres</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
MRS	<i>Monitor and Ranging Station</i>
MSAS	<i>MTSAT Satellite Augmentation System</i>
MSI	<i>Maritime Safety Information</i>
MT	<i>Message Type</i>
MTSAT	<i>Multifunctional Transport Satellites</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations</i>

NSE	<i>Navigation System Error</i>
OS	<i>Open Service</i>
PACF	<i>Performance Assessment and Checkout Facility</i>
PE	<i>Position Error</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PRC	<i>Pseudo-Range Correction</i>
PRN	<i>Pseudorandom Noise Code</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RIMS	<i>Ranging Integrity Monitoring Stations</i>
SARPS	<i>Standards and Recommended Practices</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SIS	<i>Signal-In-Space</i>
SoL	<i>Safety of Life Service</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
TSE	<i>Total System Error</i>
TTA	<i>Time to Alarm</i>
UDRE	<i>User Differential Range Error</i>
VAL	<i>Vertical Alert Limit</i>
VPE	<i>Vertical Position Error</i>
VPL	<i>Vertical Protection Level</i>
VTE	<i>Vessel Technical Error</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WWRNS	<i>World-Wide Radionavigation System</i>
XTE	<i>Cross Track Error</i>



## 8. Bibliografía

- [1] GSA - European Global Navigation Satellite Systems Agency, «What is GNSS?,» 29 Aug 2017. [En línea]. Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>.
- [2] GSA - European Global Navigation Satellite Systems Agency , «About EGNOS,» 10 Noviembre 2020. [En línea]. Available: [https://egnoss-user-support.essp-sas.eu/new\\_egnoss\\_ops/egnoss-system/about-egnoss](https://egnoss-user-support.essp-sas.eu/new_egnoss_ops/egnoss-system/about-egnoss). [Último acceso: 15 Noviembre 2020].
- [3] I. Quintanilla, *GPS: Modelos matemáticos. Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía*, Universitat Politècnica de Valencia, 2017.
- [4] A. Sánchez Durán, *Análisis para la implementación del sistema EGNOS en aeronaves no tripuladas para aplicaciones de validación de procedimientos SBAS*, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2018.
- [5] ESA - European Space Agency, «Navipedia,» [En línea]. Available: [https://gnss.esa.int/navipedia/index.php/Main\\_Page](https://gnss.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page). [Último acceso: Noviembre 2020].
- [6] European GNSS Agency (GSA), EGNOS Safety of Life (SoL) - Service Definition Document, Prague, Czech republic: ISBN 978-92-9206-028-2, 26 September 2016.
- [7] I. A. Medina, «Innovaciones en EGNOS V3,» de *Conferencia Virtual de la UOC*, 2020.
- [8] P. Zalewski, «Integrity Concept for Maritime Autonomous Surface Ships' Position Sensors,» *Sensors - MDPI*, vol. 20, nº 7, 2020.
- [9] P. Zalewski, «GNSS Integrity Concepts for Maritime Users,» Faculty of Navigation - Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland, 2019.
- [10] Department of Defense - USA, «GPS Standard Positioning Service Performance Standard,» Washington DC, 2020.
- [11] IMO - International Maritime Organization, *Resolution A.915(22)*, Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS), 29 November 2011.
- [12] IMO - International Maritime Organization, *Resolution A.1046(27)*, Worldwide Radionavigation System, 30 November 2011.
- [13] A. Cieccko y G. Grunwald, «Examination of Autonomous GPS and GPS/EGNOS Integrity and Accuracy for Aeronautical Applications,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 61, pp. 920-928, 2017.
- [14] ICAO - International Civil Aviation Organization, «Aeronautical Telecommunications,» de *Volume I - Radio Navigation Aids / Sixth Edition*, July 2006.

- [15] M. Porretta, D. Jiménez-Baños, M. Crisci, A. Fiumara y G. P.-D. Hein, «GNSS Evolutions for Maritime - An Incremental Approach,» May / June 2016. [En línea]. Available: <https://insidegnss.com/>.
- [16] P. Pintor, C. De La Casa, M. Lopez-Martinez y R. Roldán, «SBAS service based in IMO Res. A.1046(27): EGNOS maritime performance,» de *ION - International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Portland (USA), 2017.
- [17] S. Magdaleno, M. López, C. de la Casa, E. Lacarra, N. Blanco, D. Jiménez y K. Arne Aarmo, «SBAS Guidelines for Shipborne Receiver and EGNOS Performances based on IMO Res. A.1046 (27),» de *ION - Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Miami (USA), 2018.
- [18] M. López y V. Antón, «SBAS/EGNOS Enabled Devices in Maritime,» *TransNav*, vol. 12, nº 1, pp. 23-27, 2018.
- [19] G. Johnson y J. Delisle, «An Evaluation of WASS 2020+ to Meet Maritime Navigation Requirements in Canadian Waters,» de *ION - 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Miami (USA), 2019.
- [20] J. Januszewski, «Shipborne satellite navigation systems receivers, exploitation remarks,» *Scientific Journals - Maritime University of Szczecin*, vol. 40, pp. 67-72, 2014.
- [21] J. Januszewski, «Applications of global navigation satellite systems in maritime navigation,» *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 47, pp. 74-79, 2016.
- [22] D. Ibáñez, A. Rovira, M. T. Alonso, J. Sanz, J. M. Juan, G. González y M. López, «EGNOS 1046 Maritime Service Assesment,» *Sensors - MDPI*, vol. 20, nº 276, 2020.
- [23] D. Ibáñez, A. Rovira, J. Sanz, J. Juan, G. González, M. Alonso, J. López Salcedo, H. Jia, F. Pancorbo, C. Garcia, I. Martin, S. Abadía y M. López Martínez, «A kinematic campaign to evaluate EGNOS 1046 Maritime Service,» de *ION GNSS+ 2019*, Miami (USA), 2019.
- [24] A. Felski, «Has EGNOS its own place in Maritime Navigation?,» de *International Association of Institutes of Navigation World Congress*, Prague (Czech Republic), 2015.
- [25] A. Cieccko y G. Grunwald, «Examination of Autonomous GPS and GPS/EGNOS Integrity and Accuracy for Aeronautical Applications,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 61, nº 4, pp. 920-928, 2017.

