

# Fundamentos de Navegación Aérea

## Tema 5: Sistemas de Navegación. Introducción y Conceptos Básicos.

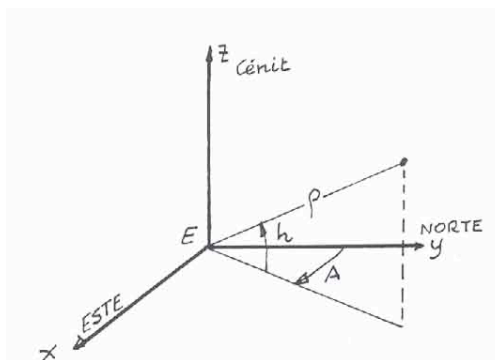


### Historia de la navegación: La estrella Polar

- En tiempos antiguos, la navegación (fundamentalmente marítima) se realizaba fundamentalmente de dos formas:
  - **navegación visual**: basada en puntos de referencia conocidos.
  - **navegación astronómica**: basada en la observación de fenómenos celestes.
- El uso de la navegación astronómica se extendió a las primeras décadas de la aviación. Aún se utilizan métodos relacionados para ciertos vehículos aeroespaciales (por ejemplo, satélites, sondas interplanetarias, misiles balísticos, etc).
- En cierto sentido, la navegación por satélite es una extensión moderna de la navegación astronómica (con señales de radio en vez de observaciones y satélites artificiales en vez de astros).
- Estudiaremos el problema en detalle gracias a la trigonometría esférica.

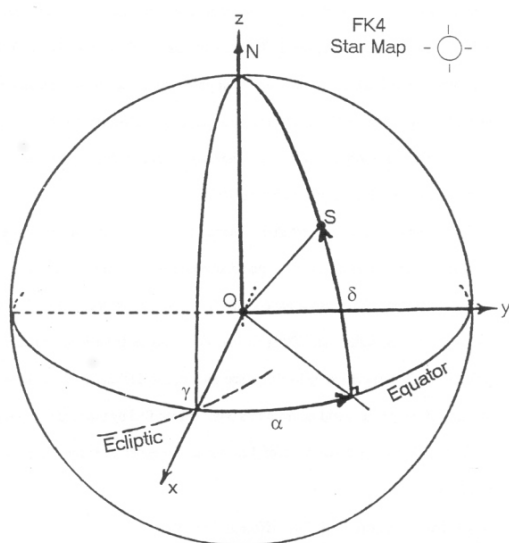


## Inciso: Sistema Topocéntrico



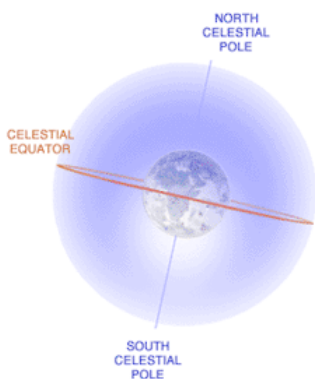
- Ligado íntimamente a la Tierra, con origen en el donde se encuentre el observador ( $E$ ).
  - Se usa para tomar medidas desde Tierra.
- 
- El plano  $Exy$  es tangente al Elipsoide Internacional WGS84 en la superficie, la dirección  $Ex$  apunta al Este, la dirección  $Ey$  al Norte, y la  $Ez$  sigue la vertical local “hacia arriba” (cénit). La dirección local “hacia abajo” se denomina nadir.
  - Las observaciones se componen de tres medidas:  $r$  o  $\rho$  (distancia al objeto);  $A$ , azimut; y  $h$ , la altura o elevación sobre el plano horizontal.

## Inciso: Sistema Inercial Geocéntrico (ECI)



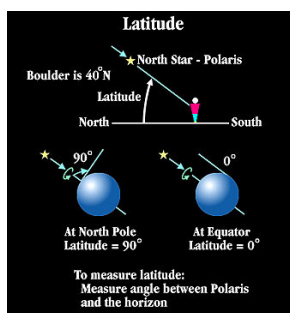
- Útil para el estudio del movimiento de cuerpos orbitando la Tierra, por ejemplo los satélites GPS, y como sistema de referencia inercial absoluto.
- El eje  $Oz$  coincide con el eje de rotación de la Tierra.
- El plano  $Oxy$  contiene al Ecuador y  $Ox$  apunta a  $\Upsilon$ , el primer punto de Aries (una dirección fija en las estrellas).
- No es realmente inercial (se está despreciando el movimiento de la Tierra en torno al Sol, y el movimiento propio del Sol respecto a las estrellas).

## Inciso: La Esfera Celeste

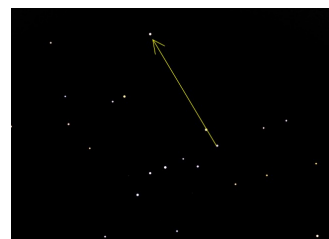
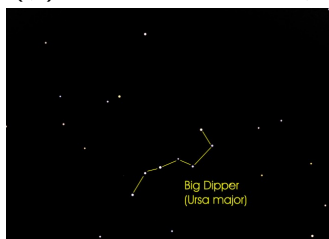


- La esfera celeste es una esfera imaginaria, donde se proyectan radialmente todos los cuerpos. Se puede considerar con el radio de la Tierra o cualquier otro radio.
- Al observar el cielo, estamos observando una parte de la esfera celeste.
- Los objetos se localizan mediante las coordenadas angulares AR (ascensión recta) y  $\delta$  (declinación).
- No obstante, puesto que en el sistema de referencia geocéntrico no se incluye la rotación de la Tierra, un observador ha de conocer su propia AR para poder localizar otros objetos usando sus coordenadas.
- La AR de un observador se denomina su tiempo sidéreo local (LST); en el tema 9 veremos como calcularlo.

## Historia de la navegación: La estrella Polar

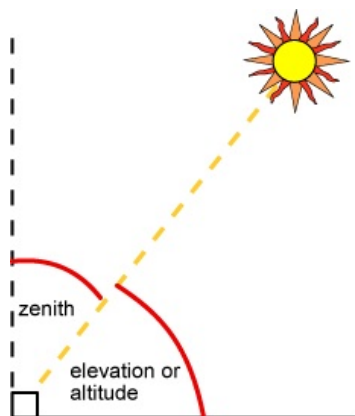


- La estrella polar (Polaris) es un punto de referencia fijo en el cielo del Hemisferio Norte; está casi alineada con el eje de rotación de la Tierra. Se localiza encontrando primero la constelación de la Osa Mayor.
- Por tanto, su elevación en el cielo sobre el horizonte ( $h_{\text{POLARIS}}$ ) es aproximadamente igual a la latitud ( $\phi$ ) del observador:  $\phi = h_{\text{POLARIS}}$ .



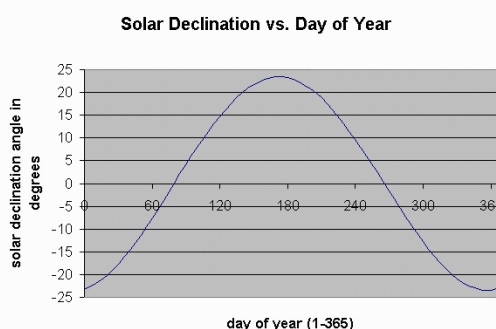
## Historia de la navegación: El Sol

- De día o con el cielo nublado, no es posible determinar  $h_{\text{POLARIS}}$ . Si es posible ver el Sol, entonces se puede usar la elevación en el cielo del Sol, al mediodía:  $h_{\text{SUN}}$ .
  - El mediodía local está determinado cuando el Sol alcanza su máxima elevación en el cielo. En ese instante pasa por el meridiano del observador.



- Se debe conocer un dato llamado la declinación del Sol,  $\delta_{\text{SUN}}$  (es la "latitud geocéntrica del Sol"). Esta declinación depende del día del año y se puede encontrar en tablas o calcularse.

■ Entonces:  $\phi = 90^\circ - h_{\text{SUN}} + \delta_{\text{SUN}}$ .



## Historia de la navegación: El hemisferio Sur

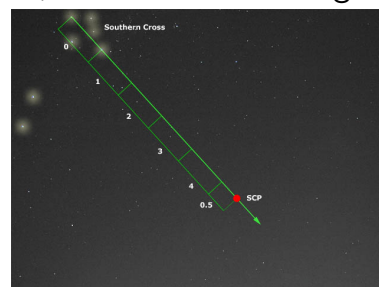
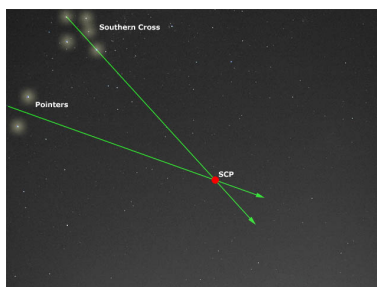
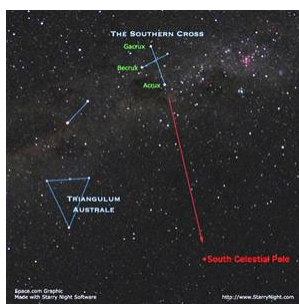
- En el hemisferio Sur, de noche, no se puede ver la estrella Polaris, ni existe ninguna estrella alineada con el eje de rotación de la Tierra hacia el Sur.



- Se emplea una constelación ("la cruz") cuyo "brazo mayor" apunta en dirección al Polo Sur celeste.

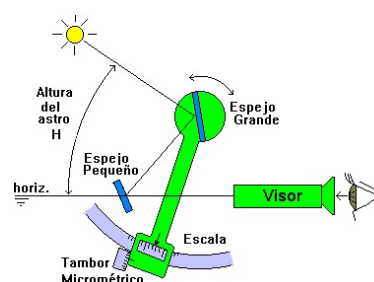
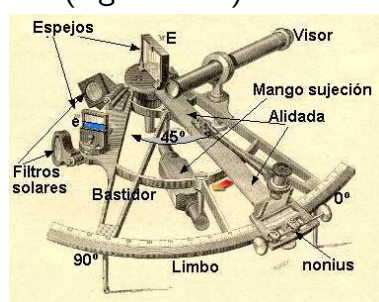
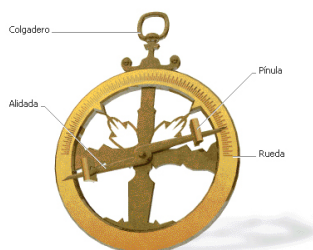
- A una distancia de 4.5 veces dicho brazo se encuentra el Polo Sur celeste. Su elevación es aproximadamente  $-\phi$ .

- Otra alternativa es usar el "Puntero de la cruz", dos estrellas cercanas a la Cruz, como se ve en la figura.



## Historia de la navegación: Instrumentos

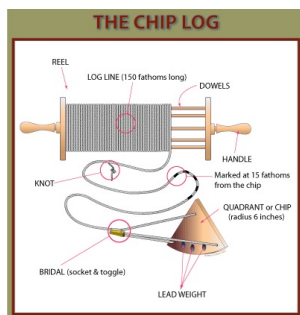
- En todas las situaciones anteriores, es necesario medir la elevación de un objeto celeste en el cielo.
- Para ello se usaban diversos instrumentos astronómicos.



- Astrolabio: media circunferencia (ant. siglo X).
- Cuadrante: un cuarto de circunferencia (siglo XII).
- Sextante: un sexto de circunferencia, con mecanismo más sofisticado (de forma que no sea necesario, p.ej., mirar directamente al Sol) y mayor precisión (siglo XVIII).

## Historia de la navegación: Navegación a estima

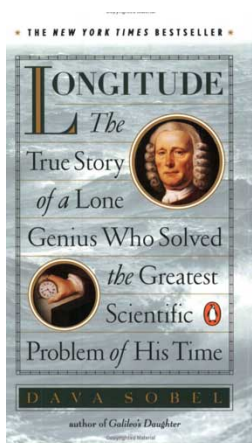
- Hallar la latitud mediante los métodos anteriormente descritos no es suficiente para encontrar la posición sobre la Tierra.
- No obstante, conocida una estimación de la posición inicial (fix), del rumbo, y de la velocidad, y midiendo el tiempo, es posible predecir la trayectoria.



- En los barcos, para predecir la velocidad, se utilizaba la llamada "corredera": formada por un lastre (barquilla), una carrete y un cordón marcado con nudos, separados 15.43 metros (1 mn/120).
- Lanzando la barquilla al agua y contando el número de nudos en 30 segundos, se estima la velocidad.
- Conocida la velocidad y el rumbo, se puede estimar (por ejemplo en una carta tipo Mercator) la trayectoria recorrida por el barco, durante un tiempo dado (medido por ejemplo con un reloj de arena), siguiendo la ruta loxodrómica.
- Problema: los errores (deriva) crecen con  $t$ .

## Historia de la navegación: El problema de la longitud I

- Con los métodos anteriormente descritos se puede conseguir una navegación “cruda” (de hecho se llegó a América), pero no es posible localizar con precisión la situación de un barco en medio de los océanos.
- Para hacerlo es necesario hallar la longitud. La solución teórica de este problema (navegación astronómica) era ya conocida en el siglo XVI.



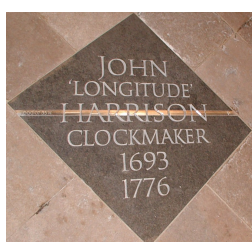
- 1 Observar una estrella de movimiento conocido o el Sol al mediodía (mediante p.ej. un sextante).
- 2 Medir el tiempo de observación (mediante un cronómetro).
- 3 Comparar con la posición de dicho cuerpo estelar en un lugar conocido (obtenida de tablas de efemérides).
- 4 Resolver el triángulo astronómico (usando trigonometría esférica).



11 / 1

## Historia de la navegación: El problema de la longitud II

- Por ejemplo, si para un día dado se determina la hora  $t$  a la que es el mediodía local, y se conoce la hora  $t_0$  en la que es mediodía local, dicho día, en Greenwich:  $\lambda \approx (t_0 - t)15^\circ$ , donde los tiempos están medidos en horas y con el mismo reloj.
- El problema es tecnológico: ¿cómo medir el tiempo con precisión a bordo de un barco que navega durante meses?



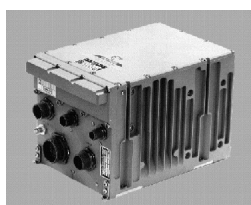
- Los mejores cronómetros del siglo XVI tenían al menos 10 minutos de error al día.
- El problema fue tan importante que varios países (España en 1598, Gran Bretaña en 1714) convocaron concursos internacionales.
- Finalmente John Harrison (1730) resolvió el problema para Inglaterra inventando un reloj que cometía un error de segundos al día.
- Su mejor reloj viajó a Jamaica desde Inglaterra cometiendo sólo 5 segundos de error en 1764.



12 / 1

## Historia de la navegación: La era moderna

- El nacimiento de la aeronáutica ha demandado una gran mejora de los métodos de navegación, que ha de tener en cuenta las 3 dimensiones.
- En la primera mitad del siglo XX nacen las radioayudas: ADF, VOR, ILS...
- En la segunda mitad del siglo XX:
  - Los avances en computación hacen posible la navegación inercial.
  - La conquista del espacio hace posible la navegación por satélite: Transit, GPS...
- Últimos avances: sensores inerciales de bajo coste, GPS diferencial, futuro sistema GALILEO...



13 / 1

## Navegación astronómica: Astronomía esférica

- Los problemas clásicos de astronomía esférica son:
  - Se observa una estrella con una elevación  $h$  y Azimut  $Az$ , desde una localización  $(\lambda, \phi)$ , en un instante  $(JD, t)$ . Determinar sus coordenadas celestes (declinación  $\delta$  y ascensión recta  $RA$ ).
  - Para una estrella dada  $(\delta, RA)$ , determinar que  $h$  y  $Az$  tendrá para un  $(JD, t)$  desde cierta localización  $(\lambda, \phi)$ .
  - **Navegación:** A partir de la observación  $(h, Az)$  de una estrella conocida  $(\delta, RA)$  un instante  $(JD, t)$ , determinar  $(\lambda, \phi)$ .
- Se resuelven utilizando la trigonometría esférica.
- Estos problemas se complican si consideramos, en vez de una estrella (infinitamente distante, fija en el sistema de referencia inercial) un planeta (orbitando en torno al Sol) o un satélite (orbitando en torno a la Tierra u otro planeta). Para ello necesitamos estudiar las órbitas (Tema 9).

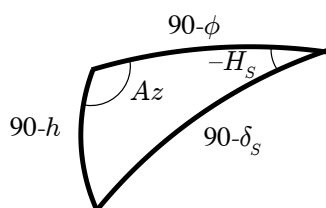


14 / 1





## Navegación astronómica: El triángulo astronómico III



- Del triángulo, obtenemos aplicando dos veces la ley de cosenos y recordando que  $\text{sen}(90 - \alpha) = \cos \alpha$  y  $\text{cos}(90 - \alpha) = \text{sen } \alpha$ , se tiene:

$$\text{sen } \delta_S = \text{sen } \phi \text{ sen } h + \text{cos } \phi \text{ cos } h \text{ cos } Az,$$

$$\text{sen } h = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta_S + \text{cos } \phi \text{ cos } \delta_S \text{ cos } H_S,$$

- Hay que recordar que:  $H_S = \text{GST}_0 + \lambda + \omega_{\oplus} t - \text{AR}_S$ .
- Usando las dos ecuaciones y sustituyendo  $H_S$  podemos obtener una pareja cualesquiera de datos:
  - Problema de posicionamiento: hallar  $\delta_S$ ,  $\text{AR}_S$ .
  - Problema de observación: hallar  $h$ ,  $Az$ .
  - Problema de navegación: hallar  $\phi$ ,  $\lambda$ .
- Hay que tener cuidado con las ambigüedades de signo; se puede usar la ley de senos  $\frac{\text{sen } Az}{\text{cos } \delta_S} = -\frac{\text{sen } H_S}{\text{cos } h}$  y recordar que  $\delta_S, \phi, h \in [-90^\circ, 90^\circ]$ .



17 / 1

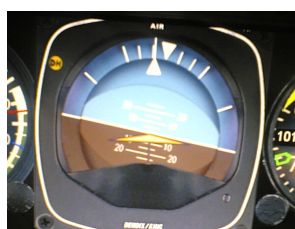
## Sistemas de navegación.

- Sistemas de navegación: permiten obtener la posición, velocidad, actitud y **tiempo** en cualquier instante. PVAT:



- P: posición
- V: velocidad
- A: actitud
- T: tiempo

- En sucesivos temas precisaremos más como se pueden representar estos datos.



18 / 1

## Errores de navegación.

- Un sistema de navegación no sólo tiene que proporcionar como salida el dato actual de PVAT. Puesto que la estimación del PVAT nunca es perfecta, también es necesario conocer una estimación del error cometido.
- Típicamente se visualiza para cada instante el error como una región de incertidumbre (típicamente un elipsoide) en cuyo centro se encuentra la estimación actual de la posición del avión.
  - El error cometido en la dirección del movimiento se llama ATE (along-track error).
  - El error cometido en la dirección perpendicular al movimiento se llama CTE/XTE (cross-track error).
  - El error cometido en la dirección vertical se llama VE (vertical error).
- Uno de los objetivos de la navegación es minimizar la incertidumbre en posición, es decir, minimizar el tamaño del elipsoide de incertidumbre.



19 / 1

## Tipos de sistemas de Navegación

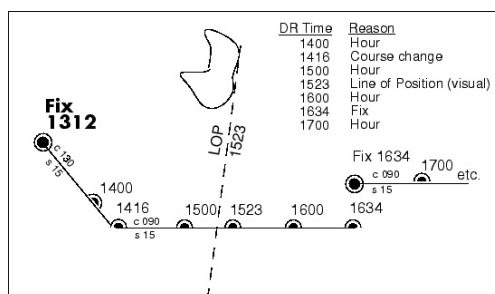
- Los sistemas de navegación se pueden dividir en dos grandes familias:
  - **Navegación autónoma:** Aquella que emplea dispositivos internos de la aeronave sin necesidad de emplear sistemas externos. Por tanto no son vulnerables a fallos en comunicaciones, ni dependen de la disponibilidad de otros sistemas ajenos. Ello los hace muy deseables, especialmente en aeronaves militares. Dos ejemplos son la antigua navegación a estima y la navegación inercial (que no es sino un tipo sofisticado de navegación a estima).
  - **Navegación por posicionamiento:** Emplea medidas externas como referencia para localizar la posición. Por ejemplo, navegación visual (basada en puntos de referencia visuales), navegación astronómica (basada en la observación de cuerpos celestes), navegación basada en radioayudas (basada en señales de radio recibidas), navegación por satélite...
- En realidad, ambos tipos de navegación son complementarios y la tendencia moderna es a integrarlos.



20 / 1

## Navegación integrada

- La navegación integrada es aquella que emplea la información proporcionada por todos los diferentes sensores y sistemas de navegación para obtener la mejor estimación PVAT posible.

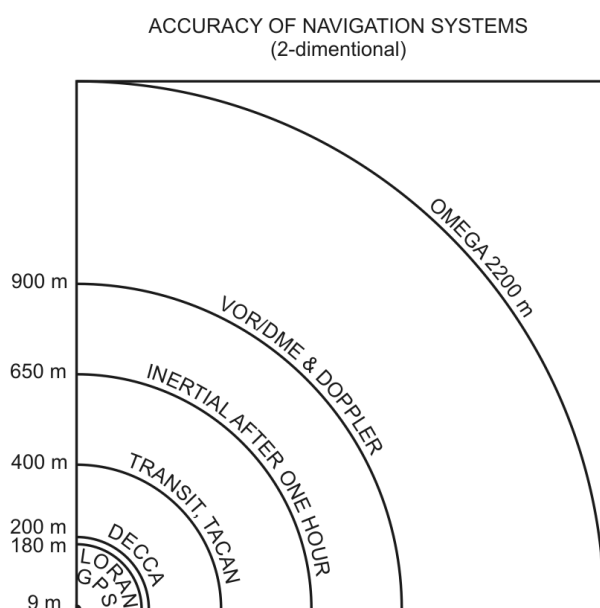


- La navegación autónoma (p.ej. inercial) proporciona una estimación continua (alto ancho de banda), integrando las ecuaciones del movimiento. Pero se degrada con el tiempo (errores no acotados).
- La navegación por posicionamiento proporciona una estimación cada cierto tiempo (bajo ancho de banda), pero con error acotado.



21 / 1

## Prestaciones operacionales



- En la tabla se resumen la mayor parte de los sistemas de navegación en uso.
- Como se puede ver, el GPS es el que consigue mayor exactitud.
- No obstante, la exactitud/precisión no es el único parámetro por el que se debe elegir un sistema de navegación.
- Otros conceptos de gran importancia son cobertura, integridad, continuidad y disponibilidad.



22 / 1

## Exactitud

- Se define **exactitud** de un sistema de navegación como el nivel de conformidad entre la posición calculada/indicada y la real. Se suele expresar en el 95 % del tiempo.
- Se diferencia entre exactitud y precisión. La precisión hace referencia a la separación (dispersión) entre las diferentes medidas. Un conjunto de valores es más preciso que otro si sus medidas están más agrupadas.
- Desde un punto de vista estadístico, la exactitud hace referencia a la media mientras que la precisión hace referencia a la varianza/desviación típica.
- Dos sistemas pueden tener la misma exactitud pero distinta precisión.



23 / 1

## Disponibilidad

- Se define **disponibilidad** (availability) de un sistema de navegación como el porcentaje del tiempo que dicho sistema es “utilizable”, dentro de su área especificada de cobertura.
- Utilizable se refiere a que el sistema cumple unos requisitos mínimos previamente especificados, por ejemplo de exactitud.
- La disponibilidad se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{MTBO}{MTTR + MTBO}$$

donde A=availability (disponibilidad), MTBO=Mean Time Between Outages (tiempo medio de funcionamiento desde una operación de mantenimiento), MTTR=Mean Time To Repair (tiempo medio de reparación si dejara de funcionar).



24 / 1

## Continuidad

- Se define **continuidad** (continuity) de un sistema de navegación respecto a una misión u operación, como la probabilidad de que dicho sistema sea “utilizable” de forma continua por toda la duración de dicha misión u operación.
- También se puede considerar por ejemplo respecto a una fase de vuelo (si un sistema de navegación se está usando durante una fase de vuelo sería conveniente que no fallara durante la duración de dicha fase). exactitud.
- La continuidad se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$C = 1 - \lambda t$$

donde C=continuity,  $\lambda$ =tasa de fallos=1/MTBO, t=periodo de tiempo en el que se quiere calcular la continuidad.

- C suele buscarse en 0.99 y 0.99999



25 / 1

## Continuidad

- Ejemplo para t= 1 hora.
- Para obtener C=0.99, MTBO=100 horas (4.16 días).
- Para obtener C=0.999, MTBO=1000 horas (41.65 días).
- Para obtener C=0.999, MTBO=10000 horas (1.14 años).
- Para obtener C=0.9999, MTBO=100000 horas (11.41 años).
- Estos valores son elevados pero en ciertos casos pueden conseguirse añadiendo redundancia.



26 / 1

## Integridad

- La **integridad** (integrity) de un sistema de navegación es la probabilidad de que NO se produzca un fallo no detectado.
- Si el sistema falla debe detectar la situación y evitar que pueda seguir siendo utilizado (por ejemplo avisando).
- Riesgo de integridad: probabilidad de que se produzca una fallo y no sea detectado.
- Debe existir un subsistema encargado de vigilar (**supervisor**), que recibe la señal base para el sistema de navegación, la analiza y determina si el sistema puede seguir siendo utilizado.
- Tiempo de alarma: tiempo máximo desde que se produce el fallo hasta que el supervisor lo detecta.
- El supervisor en general es redundante, suponiendo que hubiera dos, se puede decidir apagar el sistema de navegación correspondiente si uno de los supervisores lo indica (tipo OR, más seguro pero disminuye la continuidad) o si ambos lo hacen (tipo AND, mayor continuidad, menor integridad)



27 / 1

## Cobertura

- Volumen de espacio aéreo dentro del cual la señal recibida es suficiente para que los receptores correspondientes trabajen de forma adecuada.
- Está muy ligado al umbral de sensibilidad de los sensores.
- Si el sistema de navegación funciona en “todo” el espacio aéreo, se dice que su cobertura es global (por ejemplo GPS).



28 / 1

## Clasificación de sistemas según prestaciones operacionales

- En base a las definiciones anteriores, se define
- Medio único de navegación: para una fase de vuelo, es aquel sistema de navegación que satisface para dicha fase los cuatro parámetros operacionales de exactitud, integridad, continuidad y disponibilidad.
- Medio suplementario de navegación: para una fase de vuelo, es aquel sistema de navegación que satisface para dicha fase exactitud e integridad pero puede no satisfacer continuidad y disponibilidad. El requisito es llevar a bordo otro sistema en completas condiciones de uso clasificado como medio único para la fase de vuelo en cuestión.
- Ejemplo: Aeroneave volando en área continental con VOR como medio único y GPS como medio suplementario.



29 / 1

## Clasificación de sistemas según prestaciones operacionales

- Medio primario de navegación: para una fase de vuelo, es aquel sistema de navegación que satisface para dicha fase exactitud e integridad pero puede no satisfacer continuidad y disponibilidad. En este caso no se requiere disponer de un sistema certificado como medio único para la fase de vuelo en cuestión, pero si se debe evaluar la disponibilidad y continuidad del medio primario durante el periodo de tiempo en el que sólo se navegaría con dicho sistema.
- Comentario adicional: diferentes fases de vuelo pueden requerir diferentes niveles de exactitud, integridad, continuidad y disponibilidad. Por ejemplo despegue/aterrizaje vs. vuelo de crucero.



30 / 1