



TRABAJO FIN DE GRADO

Curso 2013-1014

INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL A BORDO DE BUQUES CON POSICIONAMIENTO DINÁMICO

Tutor: Antonio Ceferino Bermejo Díaz

Alumno: Alejandro Miguez Algaba

Grado: Náutica y Transporte Marítimo

Índice

Introducción.....	7
Capítulo I: Introducción a los sistemas de posicionamiento dinámico	9
1 Introducción	9
2 Conceptos clave sobre posicionamiento dinámico	10
3 Movimientos de un buque controlados por el sistema DP	13
4 Concepto de Station Keeping Capability	14
4.1 DNV Environmental Regularity Number (ERN)	16
4.2 Lloyd's Register Performance Capability Rating (PCR)	16
5 Concepto de Redundancia	16
5.1 Redundancia en sistemas de posicionamiento	17
5.2 Redundancia en sistemas de medición de rumbo	18
5.3 Redundancia en los sensores ambientales	18
5.4 Redundancia en los sistemas de control	19
5.5 Redundancia en los sistemas de propulsión.....	20
5.6 Redundancia en los sistemas de generación y distribución de energía.....	20
6 Equipamiento de Clases	21
7 Características de un diseño robusto	23
8 Fiabilidad de la Station Keeping Capability	25
9 Sensores y sistemas de posicionamiento PRS	26
9.1 Sistemas GNSS	27
9.1.1 GPS	28
9.1.2 - DGPS.....	30
9.1.3 DARP-GPS	30
9.1.4 GLONASS	31
9.1.5 GALILEO	32
9.1.6 BeiDou.....	32
9.2 Sistemas de cable tirante.....	33
9.3 Sistemas láser de posicionamiento	36
9.4 Sistemas hidroacústicos de posicionamiento	38
9.5 Sensores Inerciales.....	42
10 Documentación relacionada con los sistemas DP.....	42

10.1	Acreditación de los sistemas.....	43
10.1.1	<i>Certificación F.A.T.</i>	43
10.1.2	<i>Afinación mecánica</i>	43
10.1.3	<i>Iniciación de los sistemas</i>	43
10.1.4	<i>Puesta en marcha</i>	44
10.1.5	<i>Prueba FMEA</i>	44
10.2	Información sobre los equipos de abordó	45
10.3	Acreditación para el manejo de sistemas DP.....	46
Capítulo II: Introducción a los sistemas de navegación inercial		48
1	Introducción	48
2	Sensores inerciales	48
1.1	Principios físicos aplicables a los sensores inerciales	49
1.1.1	<i>Principio de equivalencia</i>	49
1.1.2	<i>Modelo de gravedad de un sistema de navegación inercial</i>	50
1.2	Sensores inerciales: Acelerómetros	51
1.3	Sensores inerciales: Giróscopos	52
1.4	Mediciones realizadas por una triada de acelerómetros	53
1.5	Mediciones realizadas por una triada de giróscopos	56
1.6	Características de los sensores inerciales	59
1.6.1	<i>Errores en los sensores inerciales</i>	60
1.6.1.1	Errores sistemáticos	60
1.6.1.1.1	<i>Desvío sistemático</i>	60
1.6.1.1.2	<i>Factor de escala</i>	61
1.6.1.1.3	<i>Error de no linealidad</i>	61
1.6.1.1.4	<i>Factores de escala de distinto signo</i>	62
1.6.1.1.5	<i>Zona muerta</i>	62
1.6.1.1.6	<i>Error de cuantificación</i>	62
1.6.1.1.7	<i>Errores de no ortogonalidad</i>	62
1.6.1.1.8	<i>Errores de desalineación</i>	63
1.6.1.2	Errores aleatorios	63
1.6.1.2.1	<i>Variación aleatoria del desvío</i>	63
1.6.1.2.2	<i>Deriva en el desvío</i>	63
1.6.1.2.3	<i>Inestabilidad del factor de escala</i>	64
1.6.1.2.4	<i>Ruido</i>	64
3	Unidad de medida inercial en navegación en una, dos y tres dimensiones...	64

2.1 Unidad de medida inercial	64
2.1.1 <i>Navegación en una dimensión</i>	65
2.1.2 <i>Navegación en dos dimensiones</i>	66
2.1.3 <i>Navegación en tres dimensiones</i>	68
4 Fiabilidad y precisión de los sistemas de navegación inercial	72
Capítulo III: Combinación de sistemas de navegación inercial con otros sistemas de posicionamiento	75
1 Introducción	75
2 Ventajas de la combinación de los sistemas inerciales con distintos sistemas PRS	75
2.1 Mejora de las mediciones de otros PRS mediante la combinación con sistemas inerciales	76
2.2 Mejora de la seguridad al utilizar sistemas inerciales como fuente de un sistema DP	76
3 Combinaciones de sistemas inerciales con otros sistemas de posicionamiento a bordo de buques de posicionamiento dinámico	78
3.1 Sistemas integrados INS/GPS	78
3.1.1 <i>Filtrado Kalman</i>	80
3.1.1.1 <i>Linearized Kalman Filtering</i>	81
3.1.1.2 <i>Extended Kalman Filtering</i>	81
3.1.2 <i>Arquitecturas de un sistema INS-GPS</i>	81
3.1.2.1 <i>Arquitectura de lazo abierto</i>	81
3.1.2.2 <i>Arquitectura de lazo cerrado</i>	82
3.1.3 <i>Niveles de integración en los sistemas INS/GPS</i>	83
3.1.3.1 <i>Loosely coupled systems</i>	83
3.1.3.2 <i>Tightly coupled systems</i>	84
3.1.4 <i>Resultados de la aplicación de los sistemas integrados INS/GPS</i>	85
3.1.4.1 <i>Detección y corrección de saltos en la posición GPS</i>	85
3.1.4.2 <i>Demanda de propulsión</i>	85
3.1.4.3 <i>Consumo de combustible</i>	87
3.1.4.4 <i>Posicionamiento en momentos en los que el GPS no se encuentre en servicio</i>	88
3.1.5 <i>Conclusiones sobre los sistemas INS/GPS</i>	89
3.2 <i>HAINS, Hydroacoustic Aided Inertial Navigation System</i>	90
3.2.1 <i>Introducción a los sistemas acústicos a bordo de buques con posicionamiento dinámico</i>	90
3.2.2 <i>Aspectos positivos de la combinación de los sistemas acústicos de</i>	

<i>posicionamiento con sistemas inerciales de navegación</i>	91
<i>3.2.3 Pruebas realizadas por el DP Committee a bordo de la plataforma oceánica “Eirik Raude”</i>	94
3.3 Sistema de navegación inercial PHINS	98
<i>3.3.1 Descripción general del sistema de navegación inercial PHINS</i>	98
<i>3.3.2 Eficacia del equipo PHINS</i>	100
<i>3.3.3 Conclusiones sobre el sistema PHINS</i>	103
Conclusiones	104
Capítulo I	104
Capítulo II	104
Capítulo III	105
Bibliografía	106

Introducción

En la actualidad existen a bordo de los buques numerosos sistemas de navegación y posicionamiento inimaginables hace unas décadas. El avance de la tecnología y el abaratamiento de los microprocesadores hacen que desde los años 70 la informática se haya adueñado de los puentes de gobierno de los buques actuales, facilitando la labor y la vida de los oficiales.

Uno de estos sistemas es el posicionamiento dinámico. Pese a que lleva siendo utilizado a bordo de determinados buques desde hace ya algunas décadas, en la actualidad supone una herramienta fundamental que ha salido de la industria petrolífera para extenderse a otros ámbitos del negocio marítimo como la instalación de cables y tuberías submarinas, acomodaciones a bordo de los denominados “floteles”, cruceros y un largo etc que hacen de estos sistemas una parte importante de la navegación hoy en día.

Una buena definición de los sistemas de posicionamiento dinámico es el dado por la *International Marine Contractors Association [1]*¹:

“A system which automatically controls a vessel's position and heading exclusively by means of active thrust”

“Un sistema que controla automáticamente la posición y el rumbo de un buque únicamente mediante medios activos de propulsión”

Como puede suponerse a partir de esta definición, en el funcionamiento de estos sistemas, el cual se explicará a lo largo de la primera parte del presente trabajo, son de vital importancia las fuentes de posición o PRS (*Position Reference System*). Existen numerosos sistemas que permiten obtener posicionamiento en la actualidad, y probablemente sean los buques con posicionamiento dinámico los que más variedad de estos equipos utilicen. La obligatoriedad de contar, en función de la Clase DP, con hasta 3 fuentes de posicionamiento independientes y basadas en distintos principios hace que la investigación sobre las combinaciones de distintos sistemas sean aún en la actualidad objeto de debate.

¹ Introduction to Dynamic Positioning, IMCA, pág. 3

Es por ello que en el presente trabajo se propone el uso de un sistema relativamente nuevo para la mejora de la calidad del posicionamiento a bordo de buques DP. Se trata de la navegación inercial, consistente en un sistema que mide las fuerzas de aceleración a las que se encuentra sometido el buque para, a partir de ellas, obtener posicionamiento. Será en la segunda parte del trabajo donde se explique con detalle este sistema y su funcionamiento, así como las ventajas que presenta su combinación con distintos sistemas de posicionamiento, y por lo tanto su aplicación en embarcaciones dotadas con sistemas de posicionamiento dinámico.

Así pues, puede considerarse que el presente trabajo consta de tres partes. La primera de ellas, a modo de introducción extensa, tratará de dar una idea del funcionamiento de los sistemas de posicionamiento dinámico, sus aspectos fundamentales y sus principales fuentes de información y posición, con la idea de proporcionar una visión de los sistemas DP que haga posible una mejor comprensión de los apartados posteriores. En la segunda parte se explicarán los principios de funcionamiento de los sensores inerciales y de su combinación dentro de los sistemas inerciales. Finalmente, trataremos la relación entre los dos sistemas a bordo de los buques equipados con sistemas DP a partir de las combinaciones de sensores de posicionamiento de distintas clases.

Capítulo I: Introducción a los sistemas de posicionamiento dinámico

1 Introducción

Como se ha explicado en la introducción del trabajo, los sistemas de posicionamiento dinámico son equipos capaces de controlar de manera automática la posición y el rumbo de un buque. En el presente apartado profundizaremos un poco más en el concepto general del posicionamiento dinámico, con el objetivo de introducir ideas fundamentales para la comprensión de los conceptos posteriormente explicados.



Imagen 1: Buque AHTSV E.R. Kristiansand, equipado con sistemas DP.

Fuente: <http://maritime-connector.com/wiki/offshore-vessels/>

Un sistema de posicionamiento dinámico o DP consiste, básicamente, en un conjunto de equipos controlados por un ordenador (Ordenador DP u ordenador de control) que persigue mantener de manera automática la posición y el rumbo de un buque únicamente mediante medios activos de propulsión, es decir, sin existencia de anclajes

al exterior. Para ello, se hacen necesarios una serie de sistemas coordinados entre sí, que incluyen equipos de medición de las variables ambientales (viento, corriente y oleaje), los anteriormente mencionados PRS, girocompases que midan el rumbo del buque y demás sistemas de propulsión y generación de energía. Además, todos estos equipos deberán cumplir una serie de características de diseño que hagan posible mantener un máximo nivel de seguridad, necesario en el tipo de operaciones que se realizan con este tipo de buques.

Como ya veremos más adelante, existen distintos niveles de complejidad dentro de los sistemas de posicionamiento dinámico, conocidos como Clases. De ellos dependerán los niveles de redundancia necesarios en el diseño de los buques y por lo tanto, la seguridad ofrecida.

Todas estas características de diseño, así como las distintas clases de equipos de posicionamiento dinámico, junto con los tipos de PRS y sensores ambientales irán siendo explicados durante esta primera parte del trabajo.

2 Conceptos clave sobre posicionamiento dinámico

Existen serie de definiciones que se consideran necesarias para el buen entendimiento de las explicaciones que se darán más adelante. A partir de aquí, se evitara la repetición de las explicaciones sobre conceptos aquí mencionados, con el objetivo de hacer más sencilla la lectura de los textos del trabajo, excepto con los conceptos de *Station Keeping Capability* y *Redundancy*, a los cuales se les dedicará un apartado propio más adelante debido a su importancia dentro del tema. Los conceptos se darán en lengua inglesa, puesto que es en esta lengua en la que se producen la mayoría de las comunicaciones y en la que encuentran escritos la mayoría de los textos sobre sistemas DP.

De esta manera, se considera necesario el conocimiento de los siguientes conceptos:

Industrial Mission: Traducido como “Misión industrial”, se define como el objetivo para el cual ha sido diseñado y construido un determinado buque.

Worst Case Failure (WCF): Traducido como “Peor caso de fallo”, se define como el fallo en el sistema DP que resulte en la máxima pérdida de capacidad del sistema.

Worst Case Failure Desing Intent (WCFDI): Se define como el remanente de propulsión y control del sistema DP tras un WCF.

DP abort status: Se define como el hecho de suspender la misión DP debido a algún tipo de fallo o emergencia.

Time to terminate: Traducido como “Tiempo hasta terminar”, se define como el tiempo necesario después de un *DP abort status* para liberar al buque de toda actividad relacionada con la misión que estuviera llevándose a cabo y maniobrar el buque hacia un lugar seguro.

Active Component: Traducido como componente activo, son generadores, propulsores, cuadros de distribución, sensores, válvulas accionadas por control remoto, etc.

Static component: Traducido como componente estático, son cables, tuberías, válvulas manuales, etc.

Power System: Traducido como sistema eléctrico, se define como el conjunto de componentes necesarios para suplir al buque con energía eléctrica.

Thruster System: Traducido como sistema propulsor, se define como el conjunto de componentes necesarios para suministrar al buque con fuerza propulsora y dirección.

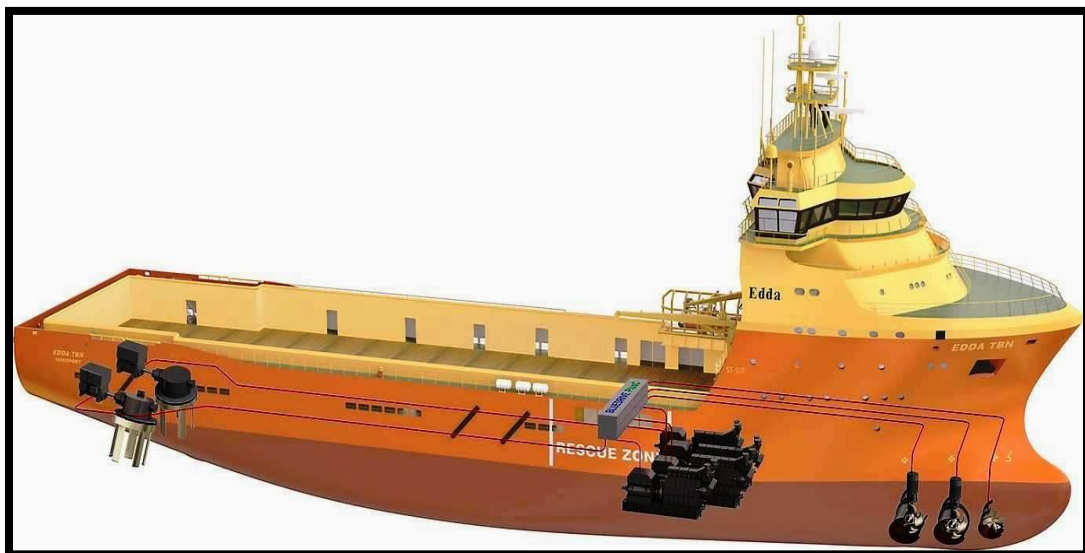


Imagen 2: Ilustración de los sistemas eléctrico y propulsor de un AHTSV.

Fuente: http://3.bp.blogspot.com/-cRCxmHn_bFc/Umb8CeZewII/AAAAAAAAACbY/hsoKmr2BynA/s1600/edda+ferd.jpg

DP Control System: Traducido como sistema de control DP, se define como el conjunto de sistemas, software y hardware necesarios para posicionar al buque a través del sistema DP.

Position Reference System (PRS): Se define como todo aquel sistema capaz de calcular la posición del buque utilizando medios radioeléctricos, acústicos, ópticos o electrónicos y que suministra al equipo DP con dicha información.

Common Mode Failure: Se define como aquel fallo que afecta a más de un sistema.

Critical Redundancy: Se define como aquel equipamiento dedicado a cubrir el WCFDI.

Fail Safe Condition: Se define como el estado en el cual un equipo vuelve a un estado seguro para el sistema DP tras un fallo.

Non-critical Redundancy: Se define como aquellos equipos destinados a ofrecer una seguridad por encima del WCFDI.

Physical Separation: En referencia a los buques DP-3, se define como una separación estanca y a prueba de incendios según los criterios aplicables a las embarcaciones DP-3.

Single Fault (SF): Se define como el hecho que determina la incapacidad del sistema para realizar una determinada tarea.

Single Fault Tolerance: Se define como la capacidad de un sistema de continuar con su función tras un SF, sin interrupciones inaceptables.

Redundancy: Se define la característica de diseño que le da al sistema la capacidad de seguir llevando a cabo una determinada función tras un SF. Esto puede conseguirse mediante la instalación de múltiples componentes, sistemas o medios alternativos de realizar una misma función.

Station keeping Capability: Se define como la capacidad real del buque para mantener la posición bajo unas determinadas condiciones de viento, oleaje y corriente.

Station keeping Analysis: Se define como el cálculo teórico de la capacidad del sistema DP para mantener la posición bajo unas determinadas condiciones de viento, oleaje y corriente.

3 Movimientos de un buque controlados por el sistema DP

Un buque, o cualquier objeto flotando sobre la superficie del mar, cuenta con seis ejes sobre los que experimenta movimiento, tres de los cuales son de rotación y tres de traslación. Los tres primeros, ilustrados en la imagen 3 son denominados cabeceo (Pitch), balance (Roll), y guiñada de rumbo (Yaw), mientras que los tres de traslación, ilustrados en la imagen 4 se conocen como avance o retroceso (Surge), arfada (Heave) y deriva (Sway). Los sistemas de posicionamiento dinámico basan su funcionamiento en el control de la guiñada de rumbo, la deriva y el avance y retroceso. Los otros tres movimientos afectan también a la posición del buque y son tenidos en cuenta por numerosos sistemas para minimizar su influencia.

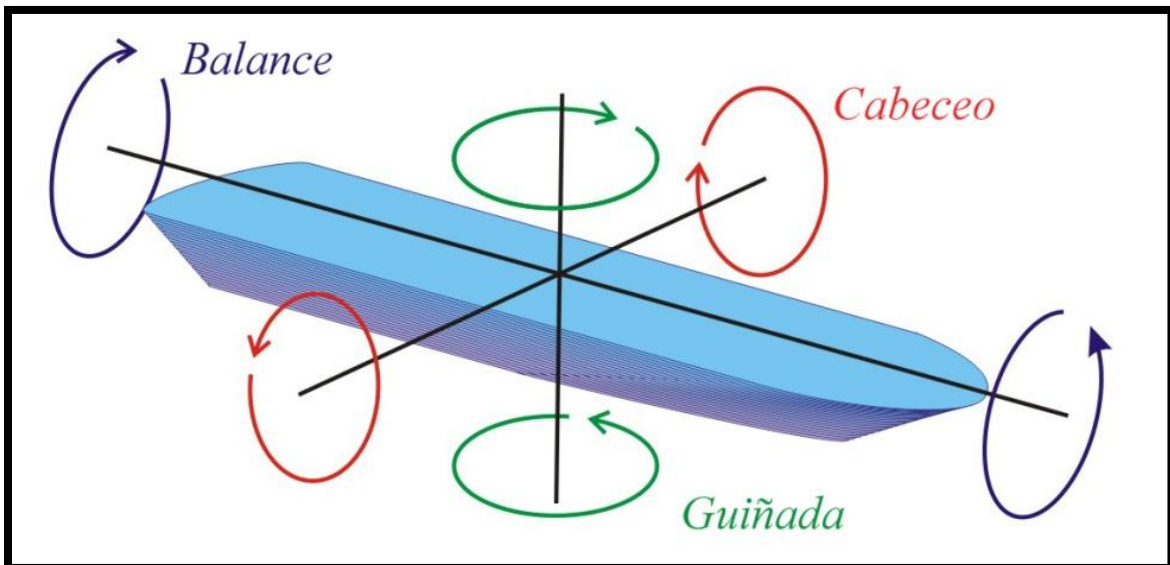


Imagen 3: Movimientos de rotación de un buque.

Fuente: Elaboración propia.

El control de estos tres movimientos comienza con la introducción, por parte del operador del sistema, de una posición y un rumbo deseado, los cuales se convertirán en los valores de referencia. Los girocompases medirán las variaciones de rumbo producidas por las guiñadas mientras que los PRS medirán los cambios de posición producidos por la deriva y el avance y retroceso. Las medidas realizadas serán comparadas con los valores de referencia y en función del error se darán las órdenes necesarias a los equipos de propulsión para llevar ese error a cero.

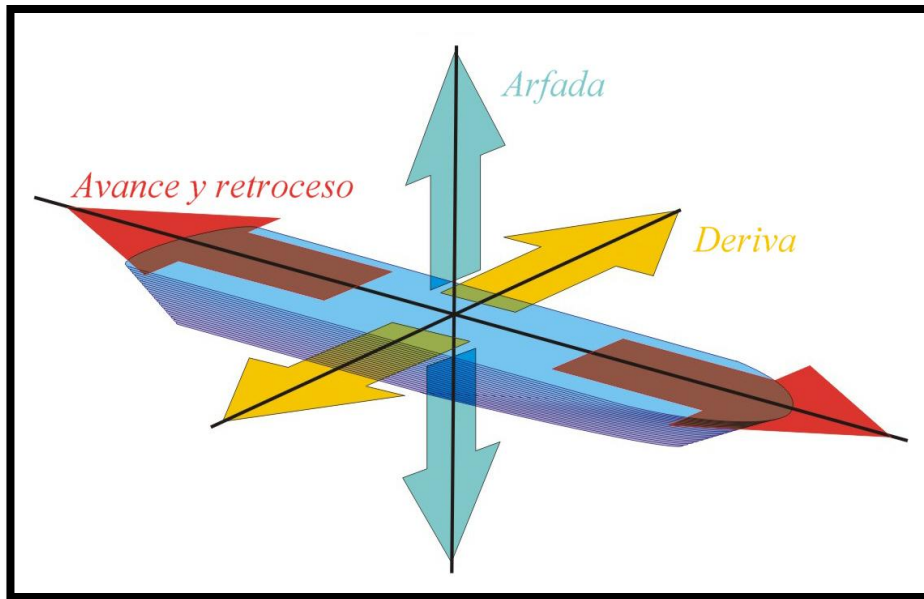


Imagen 4: Movimientos de traslación de un buque.

Fuente: Elaboración propia.

Además, existen sensores a bordo que miden los movimientos de cabeceo y balance, y cuyas mediciones son utilizadas como correcciones para aquellos PRS que precisen de ellas para un correcto funcionamiento.

4 Concepto de Station Keeping Capability

Como ya se ha explicado, la función primera de un sistema de posicionamiento dinámico es la de mantener de forma automática la posición y el rumbo de un buque. Para conseguir dicho objetivo, deben conocerse y aplicarse numerosos conceptos tanto al diseño como al manejo de los sistemas, alguno de los cuales, se pretende que los de mayor importancia, se irán explicando en los siguientes apartados del trabajo, comenzando por dos conceptos vitales, la Station Keeping Capability, que se explicará en este apartado, y la redundancia, que se explicará en el apartado siguiente.

Todos los esfuerzos que se realizan tanto en el diseño como en la operación de buques equipados con sistemas DP van destinados a contar con equipos que funcionen de forma fiable, con niveles altos de resistencia a fallos, a pérdidas de posición y en definitiva, con capacidad para mantener la posición y el rumbo. Todo ese conjunto de características deseables en estos sistemas se engloban bajo el concepto de *Station Keeping Capability*.

El establecer el nivel de Station Keeping Capability de un buque no es algo sencillo. Normalmente, esta capacidad es presentada como un diagrama polar en el que se representa la capacidad de un buque para mantener su posición en diferentes situaciones de viento, oleaje y corriente y con diferentes combinaciones de propulsores. A la hora de obtenerla, deben calcularse varios parámetros:

- ✓ Vientos de diferente fuerza y actuando desde diferentes direcciones.
- ✓ Oleaje de diferentes fuerzas y actuando desde diferentes direcciones.
- ✓ Corriente de diferentes fuerzas y actuando desde diferentes direcciones.
- ✓ La eficiencia de los propulsores y timones en distintas direcciones teniendo en cuenta las interacciones entre ambos y el casco.

En el diseño de las embarcaciones equipadas con sistemas DP, el primer paso es establecer el nivel de Station Keeping Capability que se desea obtener de dicho buque. A partir de ahí, se establece el número y potencia de los propulsores.

El cálculo de la Station Keeping Capability debe desarrollarse teniendo en cuenta múltiples casos o situaciones posibles en cuanto al funcionamiento de los propulsores del buque, debiendo ajustarse cada abanico de situaciones a la configuración específica de cada sistema. Un posible abanico de situaciones a analizar sería el siguiente:

- ✓ Sistemas intactos: Todos los propulsores están en funcionamiento.
- ✓ Fallos de nivel 1: El propulsor más efectivo falla.
- ✓ Fallos de nivel 2: Los dos propulsores más efectivos fallan.
- ✓ Fallos de nivel 3: El buque se encuentra en el estado de Worst Case Failure Desing Intent.

Una vez el buque se encuentra en servicio, se calcula de manera real dicho nivel de Station Keeping Capability. Los resultados de este cálculo deben expresarse de manera fácilmente entendible y estar siempre presentes a bordo.

Existen varias clasificaciones de los niveles de Station Keeping Capability. A continuación se explicarán dos de ellas, la primera de ellas es la utilizada por la casa noruega *Det Norske Veritas* y la segunda la utilizada por la inglesa *Lloyd's Register*.

4.1 DNV Environmental Regularity Number (ERN)

Este método consiste en un cálculo teórico desarrollado en 1970 por la casa registradora Det Norske Veritas. Se trata de unos cálculos relativamente simples basados únicamente en las fuerzas laterales causadas por el viento, la corriente y el oleaje. La eficiencia de los propulsores no es considerada y se realiza con condiciones de corriente de 1,5 nudos.

La calificación consiste en tres grupos de dígitos. El primero de ellos indica la capacidad del buque para mantener la posición en una determinada posición en el Mar del Norte con todos sus sistemas funcionando correctamente. El segundo indica la misma capacidad en el caso de que el propulsor menos efectivo falle, y el tercer grupo indica la capacidad de mantener la posición en el caso de que el propulsor más efectivo falle.

Este método es utilizado principalmente para comparar las capacidades de distintos buques a la hora de contratar un servicio para una misión determinada.

4.2 Lloyd's Register Performance Capability Rating (PCR)

La casa inglesa desarrolló a mediados de la década de los 80 su propio método de cuantificar la SKC. Este método consiste en dos grupos de dígitos, el primero de los cuales indica el tiempo durante el cual el buque puede mantener la posición con todos sus sistemas funcionando correctamente y el segundo el tiempo durante el cual el buque puede mantener su posición si el propulsor más efectivo falla. Las velocidades de oleaje y velocidad del viento se basan, igual en el método de DNV, en datos obtenidos en el Mar del Norte.

5 Concepto de Redundancia

Los buques DP realizan tareas y operaciones que, en la mayoría de los casos, entrañan grandes riesgos tanto para la vida de las personas implicadas como para el medio ambiente. En operaciones de tendido de cables o de perforaciones con plataformas entre otras, las “excursiones” fuera de la posición definida implican grandes riesgos, por lo que deben analizarse las situaciones en las que esto pueda ocurrir y tratar de evitarlas.

En el diseño de los buques DP, uno de los conceptos clave para aumentar la seguridad en el funcionamiento de los sistemas es la redundancia. La redundancia puede definirse, como se explica al comienzo del trabajo, como la capacidad del sistema DP de seguir realizando una función tras un *Single fault*. La mejor manera de conseguir esto es proveer al buque de varios sistemas capaces de realizar la misma función, de manera que si uno de ellos falla, los demás puedan suplir la función que este realizaba, y de esta manera no llevar al buque fuera de su posición.

La redundancia expresada como la repetición en un buque DP de un mismo sistema es la principal característica de la distinción de las Clases DP. La IMO en la “*IMO Guidelines for Vessels With DP Systems*” indica tres Clases de sistemas DP, a saber, DPS-1, DPS-2 y DPS-3, cada uno con un nivel de redundancia mayor que el anterior. Aunque el equipamiento de Clases será explicado más adelante, a modo de resumen puede decirse que un buque DPS-1 no presentará redundancia en todo su equipamiento, un buque DPS-2 presentará redundancia en todo su equipamiento y un buque DPS-3 presentará redundancia en todo su equipamiento y además podrá mantener su posición y su rumbo tras la pérdida total de un compartimento.

A continuación se irá explicando la redundancia aplicada a los distintos aspectos de los sistemas DP y su obligatoriedad en función de la Clase DP del buque.

5.1 Redundancia en sistemas de posicionamiento

Puesto que la función básica del sistema DP es mantener la posición, las fuentes de posicionamiento a disposición del sistema deben ser suficientes. Las exigencias de redundancia en cuanto a los PRS debe cumplirse de manera que los equipos de posicionamiento estén basados en distintos principios de medida. La instalación, por ejemplo, de dos dispositivos GPS no cumpliría con los niveles de redundancia puesto que una alteración local de las señales GPS dejaría al buque sin posición. Por lo tanto, con el objetivo de evitar los fallos en elementos comunes, los niveles de redundancia en cuanto a los PRS se considerarán cumplidos cuando cada PRS aplique distintos principios en la obtención de la posición.

En cuanto a las exigencias en el equipamiento de Clase, en los buques DPS-1, son necesarios dos PRS, mientras que en los buques DPS-2 y DPS-3 son necesarios tres.

Pese a esto, y dado que la inversión en un sistema PRS como, por ejemplo, un DGPS no es de consideración en comparación con la inversión total a la hora del diseño de uno de estos buques, es normal encontrarse con redundancia por encima del nivel obligatorio. Esto se debe a que, por ejemplo, en el caso de un DPS-2 que cuente con 3 PRS, si uno fallara, el buque quedaría fuera de Clase. Por ello, lo normal sería encontrarse con 4 PRS instalados, de manera que si uno falla, el buque siga cumpliendo con los requisitos de su Clase.

Las señales de todos los PRS que se encuentren a bordo serán suministradas al ordenador DP, el cual las comparará y asignará un peso a cada una de ellas en función de la estabilidad y continuidad de las mediciones. Esto quiere decir que en un buque DPS-2 con 3 PRS, no todos influirán de la misma manera en el cálculo de la posición final, puesto que el ordenador DP se “fiará” más de aquel PRS que le suministre mediciones más estables y continuas.

5.2 Redundancia en sistemas de medición de rumbo

El rumbo es el otro aspecto básico a controlar por el equipo DP. La forma más fiable de medir el rumbo es a través de las agujas giroscópicas, y es este el medio utilizado en los buques de posicionamiento dinámico.

Los niveles de redundancia en función de la Clase son alcanzados con un solo giróscopo en los buques DPS-1 y con tres en los buques DPS-2 y DPS-3. Además, en los buques DPS-3, uno de los giróscopos deberá estar situado en un compartimento separado.

5.3 Redundancia en los sensores ambientales

Como ya se ha explicado, para optimizar el funcionamiento de los sistemas DP es necesario conocer variables ambientales tales como velocidad y dirección del viento, corriente y oleaje. Los sensores responsables de dichas medidas también son objeto de regulaciones en cuanto a redundancia en los buques con sistemas DPS-2 y DPS-3, debiendo contar con dos sensores por cada variable medida. En el caso de los buques con DPS-1 no es necesaria la aplicación de la redundancia en este tipo de sistemas.

5.4 Redundancia en los sistemas de control

Los ordenadores son los elementos centrales de los sistemas DP y por lo tanto deben cumplir con los niveles de redundancia exigidos según las Clases. En los sistemas DPS-1 no debe existir redundancia en los ordenadores de procesamiento y de control, pero en las Clases superiores esta redundancia si existe.



Imagen 5: Consola de control de un sistema DP.

Fuente: <http://www.ship-technology.com/features/feature111251/feature111251-1.html>

En los sistemas DPS-2, encontramos los denominados “duplex”, es decir, sistemas formados por dos ordenadores iguales que realizarán las mismas tareas de manera simultánea. En estos sistemas, encontramos que uno de los ordenadores trabaja en modo on-line o como ordenador principal mientras que el otro actúa de soporte. Los resultados del control obtenidos de ambos ordenadores son comparados y en el caso de que no concordaran saltará una alarma indicativa de que se ha perdido la redundancia en el sistema.

En los sistemas DPS-3 los equipos más comunes son los denominados “triplex”, que trabajan con tres ordenadores de manera simultánea, uno de ellos trabajando on-line y los otros dos trabajando como soporte. Además, en los sistemas DPS-3, uno de los

ordenadores debe estar situado en un compartimento remoto para que en el caso de pérdida del compartimento donde se encuentre el sistema de control central, pueda utilizarse este segundo sistema con seguridad.

5.5 Redundancia en los sistemas de propulsión

La redundancia en los sistemas de propulsión toma importancia en los buques DPS-2 y DPS-3. El diseño y la distribución tanto de las hélices como de los timones y thusters deben realizarse de manera que un *Single Fault* no deje al buque sin la capacidad de mantener la posición. Para entender mejor este concepto, imaginemos un buque con 4 hélices transversales, dos a proa y dos a popa. Supongamos que las dos hélices de proa se controlan desde un mismo panel de control, mientras que las dos de popa se controlan desde otro panel. En el caso de que uno de los paneles quedara fuera de servicio, las dos hélices de proa o popa quedarían sin funcionamiento, complicando enormemente la maniobrabilidad del buque. Sin embargo, si en el diseño se tiene en cuenta las características de redundancia y se le asigna a cada panel una hélice en proa y otra en popa, la pérdida de un panel supondría una menor eficacia en la maniobra, pero seguiría permitiendo contar con una hélice transversal en cada extremo del buque.

5.6 Redundancia en los sistemas de generación y distribución de energía

La redundancia en este sector del buque se aplica en función del tipo de planta eléctrica con la que se cuente. En la mayoría de los buques DP encontraremos plantas diesel eléctricas, en las cuales la redundancia se consigue mediante la instalación de varios generadores que alimentan a diferentes cuadros eléctricos, por lo que el fallo de un generador no supone una situación de emergencia. En cuanto a los buques DPS-3, es necesario que uno de los generadores se encuentre separado en un compartimento remoto, para cumplir con el requisito de poder continuar su función tras la pérdida completa de un compartimento.

En cuanto a la distribución de energía, dependiendo de la Clase del buque, existen distintos criterios aplicables al diseño de los sistemas. Los buques DPS-3, que cuentan con las exigencias más altas, deben tener un cuadro eléctrico para cada sistema, que funcione de manera independiente, con el objetivo de evitar que situaciones como

cortocircuitos o picos de voltaje afecten a toda la red. Además, en algunos casos se puede encontrar buques que cuentan con sistemas de cableado independientes para cada sistema.

Por último debe tenerse en cuenta los denominados *Uninterruptible Power Supply* o UPS. Se considera un UPS todo aquel sistema vital para el funcionamiento del sistema. Todos los sistemas de bajo voltaje, como sensores periféricos, consolas y controladores deben estar conectados a un sistema de generación o suministro de energía alternativo, de manera que un black out total no deje sin suministro a los elementos fundamentales del sistema.

6 Equipamiento de Clases

Una vez explicados los aspectos básicos y principales de los sistemas DP, se continuará con la definición de las distintas Clases de sistemas DPS (Dynamic positioning system) existentes. La IMO, en su circular MSC/Cir.645 “*Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems*” define cuatro niveles o Clases de equipos DP, a saber, DPS-0, DPS-1, DPS-2 y DPS-3. Como ya hemos ido introduciendo a lo largo del trabajo, la principal diferenciación existente entre las Clases son los niveles de redundancia y de *Station Keeping Capability* exigibles a cada una de ellas. Las cuatro Clases de equipos DP son:

- ✓ DPS-0: Está en el límite para poder considerarse un sistema DP. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática el rumbo y permitir un control manual de la posición.
- ✓ DPS-1: Es el sistema de posicionamiento dinámico más básico. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales máximas, además de estar equipado con un control de posición manual.
- ✓ DPS-2: Este sistema de posicionamiento dinámico debe permitir al buque mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales máximas durante y tras un *Single Fault* que no incluya la pérdida total de un compartimento por inundación o incendio.

✓ DPS-3: Este sistema de posicionamiento es el de mayor nivel de fiabilidad. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales máximas durante y tras un *Single Fault*, incluyendo la pérdida total de un compartimento por inundación o incendio.

Además, existen algunas Clases o subclases que son reconocidas por otras casas de clasificación. La Germanischer Lloyd reconoce, a parte de las anteriores, las siguientes:

✓ DPS-3 (DPS-2): Esta Clase se aplica a los buques que cuentan con distintas configuraciones dentro de su equipo de posicionamiento dinámico, de manera que puede cumplir las especificaciones obligatorias para un equipo DPS-2 o para un equipo DPS-3.

✓ DPS-2 ICE: Clasificados dentro de esta Clase se encuentran los equipos que cumplen con los niveles de redundancia y *Single Fault Tolerance* de un equipo DPS-2, pero que además se encuentran preparados para trabajar en condiciones adversas de hielo y nieve.

✓ DPS-3 ICE: Clasificados dentro de esta Clase se encuentran los equipos que cumplen con los niveles de redundancia y *Single Fault Tolerance* de un equipo DPS-3, pero que además se encuentran preparados para trabajar en condiciones adversas de hielo y nieve.



Imagen 6: AHTSV trabajando en condiciones extremas de hielo.

Fuente: <http://files.vikingsupply.com/tor%20viking.jpg>

La elección de la Clase que debe ser utilizada en una determinada situación es acordada entre el armador y el cliente, pero en el presente trabajo se ha considerado necesaria la presentación de un criterio mediante el cual pueda determinarse la Clase a utilizar. El criterio elegido ha sido el creado por el *Norwegian Maritime Directorate* (NMD), en la publicación *NMD Guidelines and Notes No.28*. En ella se distinguen cuatro situaciones:

- ✓ Operaciones de clase 0: Son aquellas en las que una pérdida de capacidad para mantener la posición no crea peligro de pérdida de vidas humanas ni de daños materiales. En estas situaciones se recomiendan equipos DPS-1 o los denominados DPS-0.
- ✓ Operaciones de clase 1: Son aquellas en las que una pérdida de capacidad para mantener la posición puede derivar en daños medioambientales de pequeñas consecuencias. En estas situaciones se recomienda como mínimo buques equipados con DPS-1.
- ✓ Operaciones de clase 2: Son aquellas en las que una pérdida de capacidad para mantener la posición puede causar daños personales, contaminación o daños de considerable coste económico. En estas situaciones se recomienda como mínimo buques equipados con DPS-2.
- ✓ Operaciones de clase 3: Son aquellas en las que una pérdida de capacidad para mantener la posición puede causar accidentes fatales, con enorme costo económico y de vidas humanas. En estas situaciones se recomienda buques equipados con DPS-3.

7 Características de un diseño robusto

Existen en el diseño de los sistemas y buques DP una serie de características que es recomendable aplicar en la mayor medida posible. La aplicación de estas medidas asegurará un alto nivel de integridad de la *Station Keeping Capability*, y por lo tanto un buen nivel de fiabilidad. Dichas características son las siguientes:

- ✓ Independencia: Los sistemas y maquinaria principales del buque deben estar diseñados de manera que sus elementos sean lo más independientes posibles, evitando los *Common Mode Failures*. De esta manera, se evitará que la pérdida

de un elemento, por ejemplo un generador, conlleve la pérdida de otros elementos que, sin presentar fallo alguno en su funcionamiento interno, se vean afectados de manera secundaria.

- ✓ Segregación: Los sistemas destinados a proporcionar redundancia en cualquiera de las funciones del sistema deben tener los menos puntos en común posibles, evitando de esta manera la propagación de un fallo desde un sistema redundante hacia otro. Las conexiones innecesarias entre sistemas redundantes aumenta las posibilidades de que aparezcan *Common Mode Failures*, lo que es absolutamente indeseable.
- ✓ Autonomía: Las funciones de control de los elementos del sistema deben de estar descentralizadas, hasta el punto de que cualquier elemento de suficiente importancia (generadores, thrusters) pueda entrar en servicio de manera independiente. De esta manera se evitan los *Common Mode Failures* derivados de averías o fallos en los paneles de distribución o consolas de control.
- ✓ Fault tolerance: En especial aplicable a los buques DP2 y DP3, los sistemas y sus elementos deben cumplir con los niveles deseables de *Fault Tolerance*. Durante el diseño, deben evaluarse todas las posibles situaciones en las que pueda ocurrir un fallo, y realizar un diseño capaz de sobrellevar el mayor número de situaciones posibles. Un diseño enfocado únicamente a resistir fallos en elementos estáticos puede no alcanzar un nivel de tolerancia suficiente.
- ✓ Fault resistance: Los equipos y sistemas DP deben estar diseñados de manera que sean resistentes. De esta manera se reducen las posibilidades de fallos y averías. El trabajo en atmósferas adversas, a altas temperaturas y altos niveles de humedad deben ser posibles. Además, es recomendable aplicar grandes márgenes de error a los valores de limitación de los ambientes de trabajo.
- ✓ Impermeabilidad ante los fallos: Esta característica se define como la capacidad de un sistema redundante de continuar en funcionamiento tras un fallo en un sistema al cual este se encuentra conectado. Esta característica está relacionada con las de independencia y segregación. Los niveles de independencia y

segregación de los sistemas y equipos determinan la impermeabilidad de dichos sistemas a que un fallo producido en uno de ellos se propague al resto.

- ✓ **Diferenciación:** Este apartado es de especial importancia en los sistemas y sensores de posición, ambientales, y cualquier equipo que realice mediciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema. El uso de diferentes métodos de medida para obtener una misma información ayuda a evitar *Common Mode Failures*, y el uso de sistemas de distintos fabricantes puede resultar ventajoso igualmente, pues evita fallos comunes de software.

Un sistema a cuyo diseño se hayan aplicado estas siete características, puede considerarse un diseño robusto, que proporcionara una *Station Keeping Capability* de suficiente nivel. Pero, como se explicará en el apartado siguiente, la fiabilidad de la *Station Keeping Capability* depende de otros factores que deben igualmente tenerse en cuenta.

8 Fiabilidad de la Station Keeping Capability

A la hora de analizar la capacidad o fiabilidad de un buque DP, debe tenerse en cuenta que existen algunos factores que intervienen en dicha fiabilidad. En este aspecto, los conceptos de redundancia y fiabilidad no deben considerarse sinónimos, puesto que la redundancia es un camino para obtener un mayor nivel de fiabilidad [2]².

La “*Station Keeping Capability*” debe entenderse como un concepto amplio que abarca numerosos aspectos dentro del sistema DP y del buque. Las casas reguladoras y los estados exigen unos determinados niveles de redundancia como medio de conseguir fiabilidad, pero deben tenerse en cuenta una serie de aspectos en relación a estas exigencias que nos obligan a ir más allá de las normas sobre equipamiento para comprender todo lo que debe cumplirse a bordo de un buque DP para un funcionamiento fiable y seguro, y que no siempre estarán recogidos en la normativa sobre los sistemas DP.

El primer aspecto a tener en cuenta es la calidad de los elementos del sistema, incluyendo los elementos humanos. Que un buque cumpla los requisitos de redundancia,

² Rules for Classification and Construction. Dynamic Positioning Systems, Germanischer Lloyd, pag. 15

WCFDI o *Single Fault Tolerance* en cuanto al diseño no quiere decir que cuente con un nivel de fiabilidad suficientemente alto. Para ello, los equipos instalados deben ser de suficiente calidad, y la tripulación encargada de su manejo debe tener la formación adecuada.

Otro aspecto a tener en cuenta es el diseño del buque y del sistema DP. El concepto de *Non-critical redundancy*, ya explicado, es un buen método de conseguir un nivel alto de fiabilidad. Además, es importante un diseño robusto del sistema, que cumpla las siete características explicadas en el apartado anterior, y que sea capaz de prevenir las pérdidas de posición y las pérdidas de redundancia. Cabe destacar la importancia de que se defina la misión industrial durante el diseño del buque. Esto permitirá un sistema DP concreto y adaptado al ambiente en el que el buque deberá desenvolverse, aumentando así la fiabilidad del mismo.

9 Sensores y sistemas de posicionamiento PRS

Puede decirse que un sistema de posicionamiento dinámico nunca podrá mejorar la precisión de sus fuentes de posición. Es decir, la fiabilidad y precisión de un sistema de posicionamiento dinámico vienen marcadas por la fiabilidad y la precisión de sus sensores de posición. Es por ello que se trata de un tema de suma importancia dentro de la descripción de estos sistemas al que se le va a dedicar los siguientes apartados del presente trabajo que, por otra parte, tiene como tema principal la explicación de una de estas fuentes de posición, los sensores inerciales, que aunque se explicarán de manera reducida en este capítulo, su tratamiento se dará con amplitud en la segunda parte del trabajo, dedicada exclusivamente a ese tema.

A modo de introducción cabe decirse que existen dos tipos de posicionamiento, a saber, posicionamiento absoluto y posicionamiento relativo. El posicionamiento absoluto nos sitúa geográficamente, es decir, nos da valores de latitud y longitud. Por otro lado, los sistemas relativos nos sitúan con respecto a otro punto del cual podemos o no conocer su posición. Todos ellos son utilizados a bordo de los buques DP, y aquí se tratará de dar una pequeña muestra de los sistemas más utilizados. Cada uno de estos sistemas podría ser objeto de un trabajo completo, pero puesto que en esta parte está dedicada a dar una explicación general de los sistemas de posicionamiento dinámico, se tratará cada

apartado con la profundidad que considero necesaria para un buen conocimiento de los aspectos básicos de cada equipo. De esta manera, se hablará de los equipos GNSS, de los sistemas de posicionamiento por cable tirante o Taut Wire, de sistemas hidroacústicos, de sistemas láser y de sensores de Navegación Inercial.

9.1 Sistemas GNSS

Los sistemas GNSS, siglas en inglés de Global Navigation Satellite Systems, son todos aquellos sistemas de posicionamiento basados en la comunicación con equipos situados a bordo de satélites que orbitan la tierra. Existen varios sistemas GNSS, alguno de los cuales se explicarán con más detalle a continuación, pero todos ellos comparten un principio básico de funcionamiento. El usuario, situado en nuestro caso en la superficie del mar, obtiene su posición mediante la trilateración. Usando la información proporcionada por varios satélites, el equipo del usuario puede calcular su actual posición, con mayor o menor precisión dependiendo del sistema y de su modo de uso.

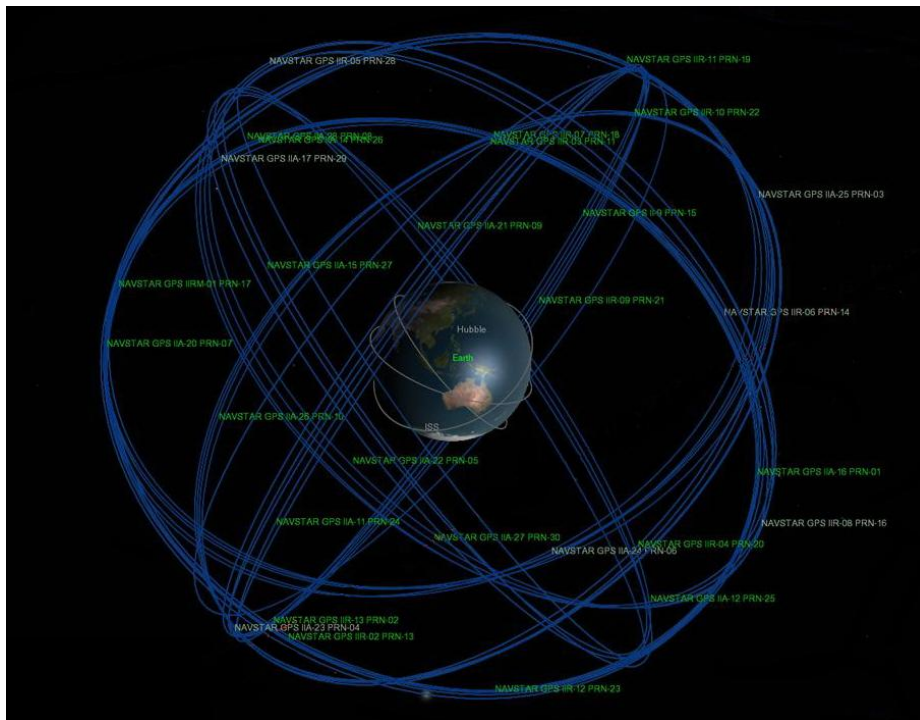


Imagen 7: Constelación de satélites NAVSTAR GPS.

Fuente: <http://www.taringa.net/posts/info/7994559/Algunas-cosas-que-quiz-a-no-sepas-sobre-el-GPS.html>

Fue en 1973 cuando el programa militar estadounidense NAVSTAR fue iniciado, y en 1978 se lanzó el primer satélite. Este fue el comienzo del sistema GNSS más utilizado

en la actualidad, el GPS, y desde entonces se han desarrollado y se desarrollan numerosos sistemas GNSS que intentan rivalizar con el GPS. En este capítulo se hablará de manera general de los sistemas GPS, GALILEO, GLONASS y BEIDOU, como forma de tener una visión amplia de los sistemas satelitarios de posicionamiento que podemos o podremos encontrar en un futuro como fuente de posición en un equipo DP.

9.1.1 GPS

El GPS, o Global Positioning System, traducción al inglés de Sistema de Posicionamiento Global, es un sistema que tiene por objetivo la determinación de la posición respecto de un sistema de referencia mundial. Su desarrollo comenzó en 1973 y alcanzó el estado de operación inicial en 1993. Consta de una constelación de 29 satélites con una órbita de 26.560 kilómetros de radio, estructurada de manera que para cualquier observador situado en cualquier punto de la superficie terrestre haya a la vista al menos 4 satélites. Este hecho hace posible, mediante trilateración, el cálculo de la posición del usuario.

El sistema GPS cuenta con tres segmentos, a saber, segmento de control, segmento espacial y segmento de usuarios.

✓ Segmento de control: Denominado internacionalmente por las siglas OCS (Operational Control Segment) se trata de un conjunto de instalaciones, entre las que se encuentran varias estaciones de monitoreo (Monitor Station), antenas terrestres (Ground Antenna) y una estación de control maestra (Master Control Station) cuyos objetivos son el monitoreo constante de los satélites, lo que permite determinar y predecir las órbitas de los mismos y controlar los relojes de a bordo. En la imagen 8 puede observarse la localización geográfica de los elementos de este segmento.

✓ Segmento espacial: Este segmento se encuentra formado por la constelación de satélites NAVSTAR GPS que dan servicio al sistema de posicionamiento. Cuando la constelación fue completada en 1993, esta constaba de 24 satélites ubicados en seis órbitas planas circulares con inclinación de 55° con respecto al ecuador, a 20180 kilómetros de altura, contando cada órbita con 4 satélites. En 2005, el número aumentó a 29, encontrando órbitas con 5 y hasta 6 satélites.

Esta disposición de los satélites permite que haya en cualquier punto y en cualquier momento, entre 5 y 11 satélites observables. Estos satélites envían constantemente una señal hacia la superficie, la cual permite el posicionamiento.



Imagen 8: Distribución geográfica de los elementos del sistema de control GPS.

Fuente: http://lazarus.elte.hu/cet/modules/toponymy-2012/_HtmlModules/_Selfstudy/S06/S06_05a.html

✓ Segmento de usuarios: Este sector está constituido por los equipos e instrumentos utilizados para captar las señales de los satélites y procesarlas para obtener la posición deseada. Estos receptores son capaces de procesar las señales de hasta 10 o 12 satélites y ofrecer posicionamiento continuo.

Estos 3 segmentos se coordinan e interaccionan para conseguir el objetivo de ofrecer posicionamiento a nivel global. Pero pese a que este servicio de posicionamiento sea actualmente el más usado a nivel mundial, su nivel de precisión, incluso eliminado el error intencionado introducido por el gobierno de Estados Unidos y conocido como Disponibilidad Selectiva, no es suficiente para su utilización en aplicaciones DP. Pese a esto, existen varios subsistemas derivados del GPS, que utilizan las señales de los satélites GPS para ofrecer un servicio de posicionamiento más preciso o de mayor utilidad para las aplicaciones DP. Estos sistemas son el DGPS y el DARP-GPS.

9.1.2 - DGPS

El principio de una red o sistema DGPS es simple. Si situamos una estación permanente en un punto cuya posición conocemos con exactitud, capaz de procesar las señales de los satélites y de obtener posicionamiento vía GPS, tendremos un receptor capaz de calcular, para cada instante, el error existente en la posición ofrecida por los satélites comparando esta con la posición real de la estación, previamente conocida. Esta diferencia es enviada a modo de corrección a los receptores DGPS situados en las cercanías de la estación permanente. La colocación de varias estaciones permanentes cubriendo una determinada zona permite crear las conocidas como WADGPS, siglas en inglés de Wide Area Differential GPS, o GPS diferencial de área amplia. Este servicio sí ofrece una precisión suficiente para aplicaciones DP, y se ha convertido en una de las fuentes de posición más usada en buques e instalaciones equipadas con sistemas DP.

9.1.3 DARP-GPS

El DARP-GPS, siglas de “Differential, absolute and relative positioning GPS” es un sistema derivado del GPS que ofrece posiciones con respecto a un punto en movimiento. Esta aplicación es ampliamente utilizada en las operaciones que requieren de buques operados mediante DP como la mostrada en la imagen 9, en la que se observan las maniobras de carga de un Shuttle Tanker desde un FPSO, en las cuales el Shuttle tanker debe saber constantemente su posición con respecto al FPSO que, aunque se encuentre anclado al fondo, experimenta movimientos.



Imagen 9: Shuttle Tanker realizando maniobras de carga de crudo desde un FPSO.

Fuente: <http://www.blogmercante.com/wp-uploads/2012/05/P1110924.jpg>

El principio básico de este sistema es que los errores derivados del posicionamiento GPS dejan de tener importancia, ya que el mismo error afecta al posicionamiento de ambos puntos, en el ejemplo anterior, al FPSO y al shuttle tanker. El funcionamiento de este sistema se basa en una comunicación entre los dos puntos cuya posición relativa se desea conocer. Siguiendo con el ejemplo, el FPSO enviaría su posición GPS al Shuttle tanker. Este, mediante el receptor, recibiría dicha información, la enviaría a un ordenador situado a bordo, y mediante los datos recibidos y su propia posición GPS, calcularía una distancia y una demora con respecto al FPSO cuya precisión es suficientemente alta para poder utilizarla como fuente de posición para el sistema DP.

9.1.4 GLONASS

El sistema GLONASS, acrónimo derivado de “Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema” es un sistema de navegación por satélite desarrollado por la Unión Soviética, y actualmente a cargo del Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. Su funcionamiento se basa en los mismos principios que el GPS, contando el GLONASS con una constelación de 31 satélites (24 en activo), en una órbita inclinada unos 65 grados con respecto al ecuador (55 grados en el caso del GPS) y a una altura de 19.000 kilómetros (20.180 kilómetros en el caso del GPS).

Este sistema de navegación no se encuentra entre las fuentes de posicionamiento comunes de un sistema de posicionamiento dinámico, ya que no siempre se encuentran visibles un número suficiente de satélites para asegurar un posicionamiento fiable y continuo, pero cabe su explicación en este trabajo debido a dos causas. La primera de ellas es que en la actualidad existen equipos combinados GPS-GLONASS capaces de recibir y procesar las señales de ambos sistemas, y por lo tanto calcular dos posiciones simultáneamente, lo cual permite una mayor seguridad. Estos receptores combinados son aplicables a sistemas diferenciales y de posicionamiento relativo, de gran utilidad para los sistemas DP. La otra razón por la que cabe tener en cuenta este sistema es el trabajo en latitudes por encima de los 70 grados norte y sur. La cobertura de los satélites GPS en estas zonas no resulta suficiente. Pero el sistema GLONASS cuenta con la ventaja de que la mayor inclinación de la órbita de sus satélites permite una mejor cobertura en estas zonas, por lo que es una posibilidad a la hora de obtener

posicionamiento en latitudes altas. Aun así, cabe destacar nuevamente que no resulta común encontrar receptores GLONASS como fuente de posición de un sistema DP.

9.1.5 GALILEO

Puesto que el presente apartado trata sobre sistemas GNSS que pueden o podrían ser utilizados como fuente de posición en un sistema DP, debe hablarse también de futuros, o no tan futuros proyectos de sistemas de navegación y posicionamiento basados en satélites que se encuentran en proceso de desarrollo en la actualidad. El primero del que vamos a hablar, muy por encima, es el sistema GALILEO. Se trata, como ya hemos explicado, de un nuevo sistema de navegación por satélite que está siendo desarrollado por la Unión Europea. Pretende convertirse en la alternativa europea al GPS, y su desarrollo se está viendo envuelto en polémica, ya que algunas voces cuestionan si realmente es necesaria la inversión contando con el sistema GPS de un país aliado como Estados Unidos. Pese a todo esto, el primer satélite de prueba fue puesto en órbita en 2005, y un segundo satélite se unió a él en 2008. Tras varias pruebas, dos satélites más fueron lanzados en 2011 y otros dos en 2012, y se espera que para finales de la presente década el sistema se encuentre en capacidad inicial de funcionamiento. En el caso de que finalmente llegara a desarrollarse por completo este sistema, sería el primero en nacer con objetivos civiles y será entonces cuando deba analizarse su funcionamiento y su precisión y concluir si puede o no ser utilizado como fuente de posición de los futuros sistemas DP.

9.1.6 BeiDou

El otro proyecto de desarrollo de sistemas de navegación por satélite que tiene cabida en la actualidad es el que se lleva a cabo por la Academia de tecnologías espaciales (CAST), dependiente de la CASTC (China Aerospace Science and Technology Corporation) a través del Programa BeiDou. En la actualidad, el denominado sistema BeiDou-1 se encuentra en funcionamiento, ofreciendo posicionamiento en dos dimensiones y comunicaciones en la región este de Asia desde 2003. Pero los objetivos de este sistema van más allá. En la actualidad se encuentra en proceso de desarrollo el sistema BeiDou-2, que contará con una constelación de entre 25 y 30 satélites, de los cuales cuatro está planeado que sean geoestacionarios. Cuando entre en servicio, se

espera que los usuarios generales obtengan una precisión de 10 metros, mientras que los usuarios de pago podrán obtener una precisión mayor. Debe esperarse, por lo tanto, a que el sistema se encuentre en funcionamiento para realizar valoraciones sobre su aptitud para el uso en sistemas DP. En principio, los valores de precisión son similares a los del GPS, por lo que podría ser utilizado en combinación con sistemas diferenciales o como fuente para sistemas DARP como el explicado anteriormente.

Cabe mencionar brevemente otros dos proyectos de desarrollo de sistemas GNSS que están en proceso de evolución. Estos sistemas son el Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS), desarrollado por La India, y el Quasi-zenith Satellite System (QZSS) desarrollado por Japón. Dado su menor importancia, no se explicarán estos proyectos, quedando reflejada simplemente su existencia.

9.2 Sistemas de cable tirante

El sistema de posicionamiento Taut Wire o cable tirante es un método eficaz de obtener una medida de la posición con respecto a un punto en el fondo marino cuya utilización está ampliamente extendida en los buques con posicionamiento dinámico. El sistema es ideal para aguas poco profundas y para situaciones en las que el buque deba permanecer en una posición fija durante un gran periodo de tiempo. Existen distintos modelos pero todos ellos aplican el mismo sistema, el cual se explicará a continuación empleando como ejemplo el modelo más común.

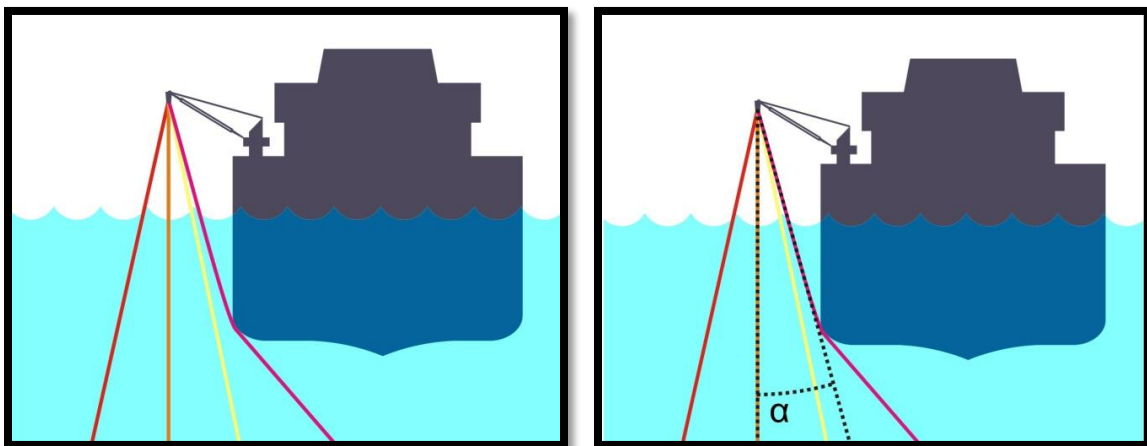


Imagen 10: Sistema de cable tirante.

Fuente: <http://www.captainsvoyage-forum.com/forum/windjammer-bar-maritime-interest/general-maritime-interest-from-cruise-to-the-mercantile-marine-and-all-ships-between/2450-details-of-ship-s-and-boats/page9>

Dentro de la variedad de configuraciones de los equipos de cable tirante, el más habitual suele estar formado por una pequeña grúa acoplada a la banda del buque (Imagen 10). Mediante esta grúa se despliega un cable el cual tiene en su extremo un peso que lo arrastra hacia el fondo. El otro extremo del cable se encuentra firme a una maquinilla de tensión constante. Cuando el buque se encuentra en la posición deseada, arría el cable hasta que el peso quede posado sobre el fondo, y una vez ocurra esto, la maquinilla comienza a trabajar en tensión constante, de manera que el cable este siempre tenso desde el fondo del mar hasta la grúa acoplada al buque. En el peso fondeado existe un sensor capaz de medir el ángulo que forma el cable con la vertical, y un sensor situado a bordo mide la cantidad de cable que se encuentra desplegado. Con estos dos datos el procesador del sistema calcula la posición del buque con respecto al punto en el que se encuentra fondeado el peso, y puesto que esta posición es conocida, calcula la posición absoluta del buque.

Existen varios aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de manejar o instalar un equipo de cable tirante:



Imágenes 11 y 12: Ángulo límite de funcionamiento de un sistema de cable tirante.

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Los equipos convencionales instalados en la banda del buque sufren, como ya dijimos, de un problema de limitación del ángulo de trabajo. Cuando el buque se traslada transversalmente y tiende a situarse encima del peso fondeado, existe la posibilidad de que el cable toque el pantoque del buque, quedando la medida del ángulo distorsionada. En las imágenes 11 y 12 puede observarse como el desplazamiento lateral del buque hace que este entre en contacto con

el cable. Es por esto que la mayoría de los equipos de este tipo cuentan con una limitación del ángulo, ángulo α en la imagen 12, normalmente situada en torno a los 20 grados, a partir de la cual la medida será desechada.

- ✓ Para que las medidas de este equipo sean fiables en cualquier situación, debe tenerse en cuenta que los movimientos de cabeceo y balance pueden afectar a la medida del ángulo y a la longitud del cable desplegado. Por lo tanto se hacen necesarios sensores capaces de detectar dichos movimientos y procesadores capaces de combinar dichas medidas con las obtenidas por el sistema de cable tirante, y así obtener medidas adecuadas en situaciones en las que los movimientos mencionados existan.
- ✓ Estos sistemas en general presentan una serie de desventajas que lo hacen inaplicable en determinadas situaciones. Debe tenerse en cuenta que el sistema obliga a tener en las inmediaciones del buque un cable que, en el caso de que las operaciones a realizar impliquen trabajos con buzos, vehículos submarinos, o cualquier otro trabajo bajo la superficie, puede ocasionar molestias, por lo que debe extremarse la precaución u optar por otro sistema como fuente de posición. Además, los equipos de cable tirante sufren distorsiones en las medidas cuando se encuentran trabajando en presencia de mareas fuertes, puesto que las fuerzas longitudinales aplicadas al cable por la corriente alteran tanto la medida del ángulo como la de la longitud del cable, inutilizando el sistema.
- ✓ Por otro lado, cuando las situaciones son favorables, el sistema es una opción simple, con un funcionamiento sencillo y un fácil mantenimiento que, como ya dijimos, hacen de él uno de los sistemas más utilizados. Su funcionamiento casi puramente mecánico hace posible que la mayoría de los problemas puedan ser solucionados a bordo, sin ayuda externa y su fácil instalación es un punto a favor a la hora de instalarlo en buques ya en uso.

Cabe mencionar además, a modo de obtener una visión más amplia del tema, que existen sistemas de cable tirante de superficie u horizontales. Mediante estos sistemas se obtienen medidas relativas de posición de una instalación o buque con respecto a otro.

El principio de funcionamiento es el mismo, la medida del ángulo formado por el cable y su longitud, corregido todo ello por las medidas de cabeceo y balance del buque. Su instalación resulta igualmente sencilla, aunque toma especial importancia el perfecto mantenimiento tanto del cable como de las maquinillas de tensión constante, puesto que un movimiento brusco de una de las instalaciones conectadas, junto con un mal funcionamiento de las maquinillas o el mal estado del cable puede ocasionar la rotura del mismo, con el consiguiente peligro para la tripulación que se encuentre en las proximidades.

9.3 Sistemas láser de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento por láser se basan en la medición de la distancia y la demora entre el escáner y uno o más objetivos fijos. En la actualidad los dos sistemas o equipos para el posicionamiento por láser más importantes son el CyScan y el Fan Beam. A continuación se explicarán de manera general ambos sistemas.

✓ **CyScan:** El funcionamiento de este sistema es similar al de un radar convencional. Cuenta con un escáner que gira 360° cada segundo, mientras emite el láser. Por otro lado, en el objetivo, se encuentran instalados unos reflectores planos o cilíndricos en función del ángulo de aproximación que se desee, en los cuales se refleja el láser y es detectado nuevamente por el escáner. Siguiendo con el símil del radar, la antena sería el equivalente al escáner, y el impulso electromagnético equivaldría al láser.

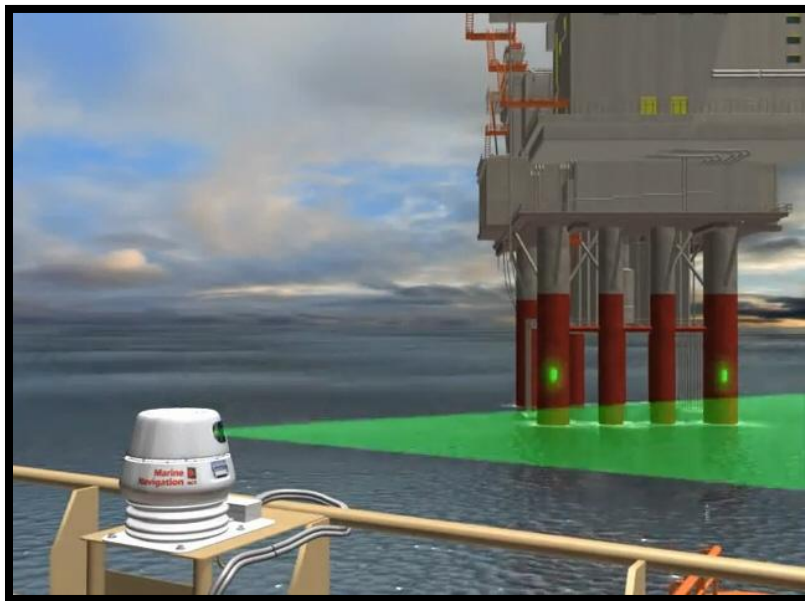


Imagen 13: Representación del sistema CyScan.

Fuente: <http://nauticadynamics.com/Useful-Links.php>

El equipo cuenta con un alcance de 2000 metros en condiciones ideales, pero se ve fuertemente afectado por condiciones de lluvia, nieve o niebla. Además, debe tenerse en cuenta que los movimientos de balance y cabeceo del buque afectarían a las mediciones del sistema, por lo que el escáner debe ir montado sobre un sistema electromecánico que corrige automáticamente los movimientos del buque, manteniendo el láser siempre paralelo a la superficie del mar.

✓ Fan Beam: El principio de medición es similar al del CyScan, puesto que el sistema mide la demora y la distancia a los objetivos. La diferencia se encuentra en el escáner. Mientras que el escáner del CyScan gira 360 grados por segundo, el Fan Beam realiza movimientos horizontales a izquierda y derecha con una amplitud de 20°. Estos movimientos van ajustando su dirección en función de hacia dónde se mueva el objetivo con respecto al escáner. Al igual que el CyScan, puede funcionar con varios objetivos al mismo tiempo. El alcance es de unos 500 metros e igualmente deben corregirse los movimientos de balance y cabeceo del buque.



Imagen 14: Sistema FanBeam

Fuente: <http://www.mdl-laser.com/resources/images/products/14987/imgcy cler/large/Fanbeam%20installed%20on%20vessel.jpg>

Ambos sistemas, y cualquier otro sistema láser que funcione según el mismo principio, tienen algunas ventajas importantes. Puesto que los objetivos son simplemente materiales reflectantes o pequeños prismas, su instalación resulta extremadamente sencilla, ya que ni si quiera requieren suministro eléctrico. Además, la precisión de estos sistemas en buenas condiciones es bastante alta, llegando a errores en la distancia de 20 cm, y en la demora de 0,2 grados. Por otro lado, las desventajas provienen todas de los problemas relacionados con la lente o el láser. La lente puede verse oscurecida por las rociones de agua salada o por humos provenientes de la máquina del buque. Además, esta no recibirá bien el láser cuando el sol le dé de manera directa, y puede realizar medidas erróneas en presencia de luces cercanas, sobre todo durante la noche.

9.4 Sistemas hidroacústicos de posicionamiento

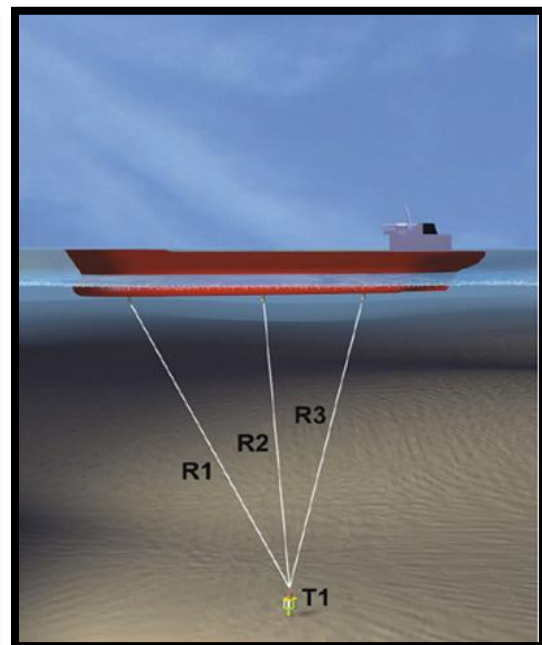
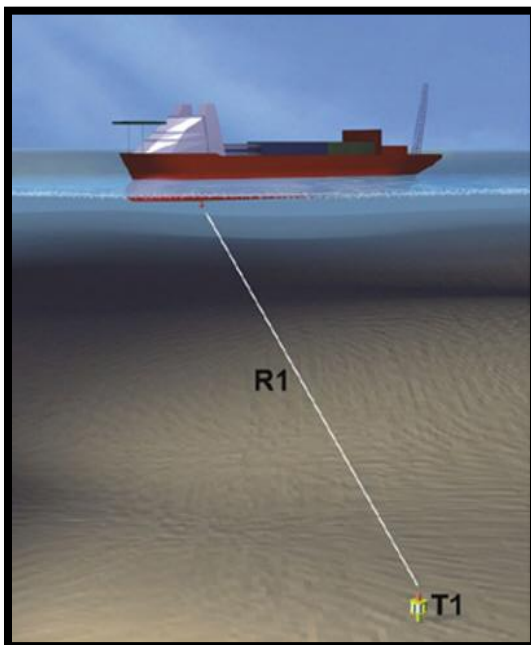
Los sistemas de posicionamiento acústicos se basan en la medida del tiempo que tarda un impulso sonoro en viajar a través del agua desde el emisor hasta el receptor. Estos sistemas ofrecen un buen resultado en cuando a la precisión de sus medidas, y son ampliamente utilizados en los buques equipados con sistemas DP. Además, en la segunda parte del trabajo se tratará la aplicación de este tipo de sistemas de posicionamiento conjuntamente con los sistemas inerciales, combinación que, como ya veremos, ofrece unos resultados realmente positivos.

Aunque basándose todos ellos en el principio anteriormente explicado, existen en la actualidad 3 tipos de sistemas acústicos de posicionamiento, a saber, los sistemas acústicos SSBL (Super-short Baseline), los SBL (Short Baseline) y los LBL (Long Baseline). Cabe mencionar también los MULBL (Multi Users Long Baseline). Para una mejor comprensión de las explicaciones, debe definirse antes qué se entiende por línea base. El posicionamiento relativo del transductor con respecto al transpondedor se realiza mediante triangulación. El transductor emite un impulso que es detectado por dos o más elementos receptores que responderán, y cuya señal será recibida nuevamente por el transductor. Se denomina línea base a la distancia existente entre los puntos que reciben el impulso desde el transductor. Cuanto mayor sea la distancia entre los transpondedores, mayor será la precisión de la medida.

Una vez explicado esto, resultará más sencillo comprender la diferencia entre los

sistemas que se explican a continuación:

- ✓ **Sistemas acústicos SSBL:** Estos sistemas se basan en la medición de la distancia y del ángulo en la cual se recibe la respuesta desde el transpondedor (T), situado en el fondo marino, por parte del transductor (R), situado en el fondo del casco del buque. El nombre que reciben estos sistemas se debe a que la línea base sobre la que se miden los ángulos es menor de 10 centímetros, y está situada en su totalidad en un único transpondedor. Es por esto que la precisión de estos sistemas se ve superada claramente por la de los otros tipos de sistemas, que explicaremos más adelante, y que cuentan con líneas base mayores debido a un mayor número de transpondedores.
- ✓ **Sistemas acústicos SBL:** Estos sistemas se caracterizan por estar compuestos de varios transductores situados en el casco del buque que interrogan a un único transpondedor situado en el fondo marino, siendo en este caso la línea base la distancia entre los transductores situados en el casco. La precisión de estos sistemas supera a la de los sistemas SSBL, y es común su instalación en dragas o barcasas semisumergibles



Imágenes 15 y 16: Sistemas SSBL y SBL

Fuente:
[http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/SSBLbig.jpg/\\$File/SSBLbig.jpg?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/SSBLbig.jpg/$File/SSBLbig.jpg?OpenElement)
[http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/SBLbig.jpg/\\$File/SBLbig.jpg?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/SBLbig.jpg/$File/SBLbig.jpg?OpenElement)

✓ **Sistemas LBL:** Estos sistemas cuentan con un campo de transpondedores situados en el fondo marino, que son interrogados desde un transductor situado en el fondo del casco del buque. Las distancias entre los transpondedores son mayores que en los dos sistemas anteriormente explicados, y por lo tanto la precisión de las medidas es mayor. La disposición más común de los transpondedores es formando un pentágono, estando situado cada transpondedor en uno de los vértices del mismo, y el buque o plataforma en el centro. Debido a la gran precisión que suministran, estos sistemas son ampliamente utilizados en plataformas de perforación.

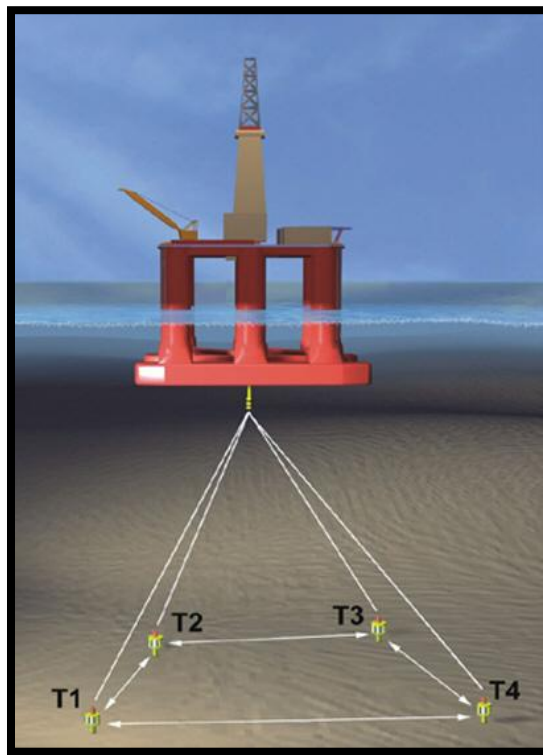


Imagen 17: Sistema LBL

Fuente:
[http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/LBLbig.jpg/\\$File/LBLbig.jpg?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0239.nsf/obj/LBLbig.jpg/$File/LBLbig.jpg?OpenElement)

✓ **MULBL:** Este tipo de sistemas en realidad no suponen una disposición diferente de los elementos, sino que permiten que los transpondedores situados en el fondo como parte de un sistema LBL puedan ser utilizados por varios buques al mismo tiempo. En los campos de perforación, donde trabajan plataformas, buques hoteles, buques AHTSV (Anchor Handling Tug Supply Vessel), es-

tos sistemas permiten que todos ellos puedan utilizar el mismo conjunto de transpondedores para su posicionamiento.

Todos estos sistemas cuentan con ciertas ventajas. La precisión ofrecida es suficiente para las aplicaciones DP, teniendo, como hemos explicado, diferentes niveles de precisión en los diferentes sistemas. Por otro lado, cabe mencionar que la reparación de estos sistemas en caso de fallo puede resultar dificultosa, debido a la situación de los transductores en el fondo del buque. Además, sus mediciones pueden verse alteradas por ruidos indeseados producidos por las hélices de los buques u otros sistemas acústicos.

Como último aspecto a tratar sobre estos sistemas, encuentro interesante explicar las combinaciones existentes entre los equipos acústicos y otros sistemas de posicionamiento como el DGPS. A la hora de colocar los transpondedores en el fondo marino puede optarse por diferentes opciones; realizarlo a través de vehículos submarinos resulta costoso pero es necesario cuando la configuración general de los transpondedores en el fondo es importante. Pero existe el problema de conocer la situación exacta de cada transpondedor para poder calcular la posición relativa con respecto al mismo. Pues la solución a este problema la ofrece la colaboración con otros sistemas de posicionamiento. Como ejemplo se comentará el caso del DGPS, que es realmente sencillo. Si se arroja un transpondedor por la borda, cuando este llegue al fondo, la posición final habrá variado con respecto a la posición de lanzamiento, puesto que el transpondedor habrá sufrido desviaciones en su caída. El desconocimiento de la posición final con suficiente precisión hace inútil el posicionamiento acústico, ya que para que este sea posible se necesita conocer la posición exacta del transpondedor. Aquí entra en escena el sistema DGPS. En los buques que cuentan con sistemas adecuados, es posible interrogar al transpondedor, obtener una posición relativa del mismo con respecto al buque, y como la posición del buque es conocida mediante las mediciones DGPS, asignar al transpondedor su correspondiente posición absoluta. Conociendo esta posición, es ya posible utilizar el posicionamiento acústico con total seguridad. Esta herramienta permite, como ya dijimos, una colocación sencilla de los transpondedores, que en otras situaciones, deberían ser colocados mediante cables o incluso mediante vehículos submarinos.

9.5 Sensores Inerciales

Uno de los medios de posicionamiento relativo menos convencionales que se encuentra en la actualidad en proceso de introducción en los sistemas DP es la navegación inercial. Citando el libro “*Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*” [3]³:

“An inertial navigation System is an autonomous system that provides information about position, velocity and attitude based on the measurements by inertial sensors and applying the dead reckoning principle”

“Un sistema de navegación inercial es un sistema autónomo que proporciona información sobre posición, velocidad y altitud basándose en las mediciones de sensores inerciales y aplicando la estima”

El sistema, a través de acelerómetros y giróscopos, es capaz de medir las aceleraciones sufridas por el buque. Integrando dichos valores obtenemos velocidad, e integrando nuevamente, posición. Dada una posición inicial, el sistema es capaz de medir las variaciones de posición sufridas por el buque, y por estima, saber la posición actual del mismo. Pero estos sistemas cuentan con una gran desventaja, y es que el algoritmo mediante el cual se integran los valores de aceleración introduce un error que crece de manera exponencial con el tiempo, lo que hace inviable el uso de la navegación inercial durante periodos largos de tiempo. Pero, como veremos en la tercera parte del trabajo, este sistema resulta sumamente ventajoso combinado con otros sistemas de posicionamiento y por lo tanto su aplicación resulta realmente positiva en los sistemas de posicionamiento dinámico. Todo ello se tratará extensamente en la parte dedicada a ello más adelante.

10 Documentación relacionada con los sistemas DP

El diseño, capacitación y manejo de sistemas de posicionamiento dinámico requiere la realización y mantenimiento de una serie de documentos que certifiquen que el sistema cuenta con los niveles de eficiencia y calidad requeridos por la casa reguladora a cuyo reglamento se halla sometido el diseño del sistema.

³ Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their integration, pág. 125

Dentro de estos documentos podemos diferenciar entre documentos de certificación de calidad o eficiencia del sistema y documentos informativos sobre diferentes aspectos del mismo, que deben encontrarse a bordo siempre para que el oficial DP pueda realizar en ellos cualquier consulta. Además, el operador del sistema también debe acreditar su preparación para el manejo de estos sistemas.

10.1 Acreditación de los sistemas

Los documentos del primer grupo dependerán de la casa reguladora a la cual se encuentre sometido el sistema, pero pueden destacarse una serie de pruebas a las cuales deben someterse la gran parte de los equipos, con el objetivo de demostrar unas capacidades mínimas. Estas pruebas, ordenadas por orden cronológico de realización sobre un buque o proyecto son:

10.1.1 Certificación F.A.T.

La prueba de certificación F.A.T. O Factory Acceptance tests. La anatomía de la prueba puede variar de unas casas reguladoras a otras, pero de forma general consiste en la primera prueba a la que debe someterse todo el equipamiento del buque, que se encontrará todavía en una fase de diseño o construcción avanzada. Los test deben realizarse en concordancia con los niveles de eficiencia y eficacia exigidos según la Clase del sistema instalado.

10.1.2 Afinación mecánica

Es la primera prueba que se realiza una vez los equipos están instalados. En esta prueba se evalúa si todos los cables, tuberías y demás elementos estáticos funcionan correctamente, sin la presencia de cortocircuitos, derivaciones o cualquier otro impedimento.

10.1.3 Iniciación de los sistemas

En esta prueba se evalúa el funcionamiento de los equipos instalados en su configuración básica preestablecida. Se activan todos los sistemas del buque y se comprueba su funcionamiento, asegurándose de que no existen fallos de software.

10.1.4 Puesta en marcha

Es la última prueba antes de las pruebas de mar. En ella se activan todos los equipos y se interactúa con ellos cambiando las condiciones de trabajo del buque para comprobar que los sistemas responden correctamente.

10.1.5 Prueba FMEA

Puede considerarse como la prueba de mar de un buque con posicionamiento dinámico. Los test FMEA o Failure modes and effects analysis son un requerimiento de las casas reguladoras para los buques DPS 2 y DPS 3. Los resultados de esta prueba dan a los buques DP un nivel FMEA. Este nivel suele ser establecido por el armador a la hora de diseñar y construir el buque, puesto que los efectos de un FMEA bajo pueden suponer la imposibilidad de la utilización del buque para determinadas misiones industriales. Esta prueba evalúa cuatro características principales del buque, las cuales se explican a continuación:

- ✓ Capacidad de actuación: Estas pruebas evalúan si el buque cuenta en la práctica con la capacidad de mantener la posición acreditada según su Clase. Se evalúan todos los sistemas redundantes de forma independiente para asegurarse de que cada uno de ellos cuenta con la capacidad necesaria.
- ✓ Capacidad de protección: Este grupo de pruebas evalúa la capacidad de las funciones protectoras dentro del sistema, sobre todo en lo relacionado con los equipos redundantes, los *Common Mode Failures* y la impermeabilidad ante los fallos.
- ✓ Capacidad de detección: Con estas pruebas se evalúa la capacidad de los sistemas de detección del buque. Dentro de estos sistemas encontramos los paneles de alarmas, sensores de posición, etc.
- ✓ Información: Estas pruebas se limitan a recopilar información sobre los estados posteriores a un *Single Fault* o un WCF o cualquier otro fallo producido en el sistema, con el objetivo de mejorar las futuras actuaciones de los oficiales DP a cargo del buque y de asegurarse de que el buque cuenta con los medios necesarios para superar dichas situaciones.

La realización de todas estas pruebas suele suponer un problema para el armador puesto que una vez el buque sale de astilleros el interés del armador es que el buque entre en servicio lo antes posible. Esto ha originado una serie de pruebas FMEA que se realizan en una única condición y siguiendo procedimientos que no aseguran 100% que se cumplan los niveles necesarios. Estas pruebas deben realizarse siguiendo procedimientos adecuados y en las tres situaciones que se especifican en las reglamentaciones, que son abarloado a otro buque, en aguas poco profundas y en aguas de gran profundidad. Solo realizando las pruebas de esta manera se asegurará que los niveles de eficiencia y calidad obtenidos de la evaluación sean lo más próximos a la realidad posible.

10.2 Información sobre los equipos de abordó

Existe otro tipo de documentos que deben permanecer a bordo y al alcance del oficial DP para su consulta en cualquier momento. Estos documentos recogen información sobre el diseño y manejo de todos los equipos críticos del sistema. Entre ellos podemos encontrar:

- ✓ El manual de funcionamiento de la consola de control DP.
- ✓ Una descripción general del sistema incluyendo un diagrama de bloques que ilustre como se relacionan los distintos equipos del sistema.
- ✓ Una explicación detallada del sistema de alarmas relacionadas con las funciones DP.
- ✓ El certificado del análisis de la *Station Keeping Capability* incluyendo las fuerzas ambientales, las potencias propulsoras y las capacidades del buque en un caso de WCF.
- ✓ Explicaciones detalladas del frenado de emergencia de los propulsores.
- ✓ Un check-list que incluya los planes de inspección y mantenimiento de los sistemas.

Además, entre estos documentos deberá encontrarse aquella información que se considere necesaria sobre:

- ✓ Sistemas de propulsión.
- ✓ Sistemas de generación de energía.

✓ Sistemas de control DP.

10.3 Acreditación para el manejo de sistemas DP

A bordo de un buque con sistemas DP encontramos la figura del DPO o *Dynamic Positioning operator*, que junto con el capitán y los oficiales es el encargado de controlar las funciones DP del buque. En la actualidad existen varias vías para obtener dicha certificación, siendo la más aceptada la del *Nautical Institute*, que ofrece dos niveles de formación. El esquema de formación de los DPO es el que se muestra a continuación.

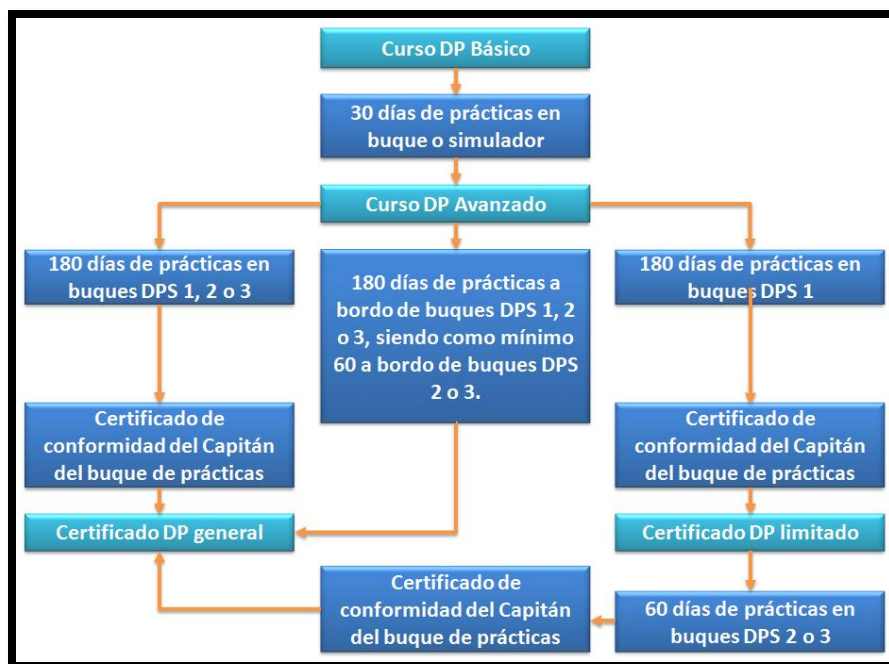


Imagen 18: Proceso de formación de un DPO.

Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse, esta formación se encuentra separada en varias fases. La primera de ella se compone de una formación teórica sobre los sistemas DP en la que el alumno deberá adquirir los conocimientos básicos sobre los sistemas empleados a bordo de estos buques, tales como elementos de control DP, sensores de posicionamiento, tipo de embarcaciones que usan sistemas de posicionamiento dinámico, requisitos y regulaciones sobre redundancia, etc.

Una vez superada la fase de formación teórica el alumno deberá acreditar un periodo de prácticas a bordo de un buque con sistemas de posicionamiento dinámico y cumpliendo

labores dentro del mismo sistema. Dependiendo de la Clase DP del buque en el que se realicen esas prácticas, el alumno podrá obtener el título DPO limitado (si las prácticas se realizan en buques de Clase DPS1) o DPO ilimitado (si las prácticas se realizan en buques de Clase DPS 2 o DPS 3).

La mínima titulación exigible para la realización de los cursos de operador de sistemas de posicionamiento dinámico será la marcada por el STCW en sus puntos II/1 – II/2 – II/3.

Capítulo II: Introducción a los sistemas de navegación inercial

1 Introducción

Los sistemas inerciales para el posicionamiento de vehículos son sistemas capaces de establecer la posición y velocidad del mismo en un entorno tridimensional mediante la determinación de las aceleraciones y rotaciones a las que este se ve sometido. Estos sistemas son conocidos por las expresiones inglesas “*navigation in a box*” o “*black-box navigation*” debido a que todo el instrumental necesario se encuentra en una carcasa que no necesita de medios exteriores al buque para su funcionamiento. El en campo de la navegación marítima, es un sistema relativamente poco utilizado, pero que puede ofrecer grandes ventajas sobre todo en las embarcaciones que requieren un posicionamiento continuo y preciso, como es el caso de los buques o plataformas dotados con sistemas de posicionamiento dinámico. Es precisamente dicha combinación el tema sobre el que trata el presente trabajo, y habiendo explicado ya los aspectos básicos de un sistema DP, se procederá ahora a desarrollar algunas explicaciones sobre los sistemas de navegación inercial.

2 Sensores inerciales

Como hemos dicho, los sistemas inerciales de posicionamiento basan su funcionamiento en la determinación de las aceleraciones y las rotaciones sufridas por un vehículo en un entorno tridimensional. Por lo tanto, lo primero que que debe desarrollarse son los dispositivos capaces de medir dichos parámetros y que por lo tanto son la base fundamental de cualquiera de estos sistemas. Estos dispositivos, denominados sensores inerciales, son los acelerómetros, encargados de medir las aceleraciones, y los giróscopos, encargados cuantificar las rotaciones. Para poder comprender las mediciones de estos dispositivos, se considera básico el conocimiento del principio físico de la equivalencia y de los modelos gravitatorios, que se explicarán a continuación.

1.1 Principios físicos aplicables a los sensores inerciales

1.1.1 Principio de equivalencia

El principio de equivalencia postula que un sistema inmerso en un campo gravitatorio es puntualmente indistinguible de un sistema de referencia no inercial acelerado. Explicado de una manera más sencilla, existe cierto observador acelerado que no puede distinguir si las partículas, y por lo tanto los objetos de su alrededor, se mueven o no dentro de un campo gravitatorio.

Para una mejor comprensión de este principio de gran importancia en el funcionamiento de los sensores inerciales se usará el ejemplo del ascensor y el cohete. Supongamos un observador situado en un habitáculo sin aperturas exteriores y completamente aislado del mundo exterior. Imaginemos que este observador deja caer un objeto que tiene en su mano y este cae hacia el suelo del habitáculo tal y como se espera debido a la aceleración de la gravedad. Existen dos posibles situaciones que harían que el objeto cayera de esta manera. La primera de ellas es que efectivamente el habitáculo se encuentre en la superficie terrestre y que sea la aceleración de la gravedad la que haga caer el objeto. Pero esta misma situación se produciría si el habitáculo se encontrara a bordo de un cohete en el espacio profundo, fuera de la influencia de cualquier objeto másico, y por lo tanto no afectado por ninguna fuerza gravitatoria, cuyos motores proporcionarían una aceleración igual a la generada por la gravedad terrestre. En este segundo caso, sería el suelo del habitáculo el que se desplazaría hacia el objeto con una aceleración igual a la de la gravedad, pero para el observador ambas situaciones serían indistinguibles.

Supongamos ahora que el observador se encuentra en un ascensor que cae libremente. El observador sentiría que su cuerpo carece de peso, puesto que no existe, según su percepción, ninguna fuerza que lo acelere hacia el suelo. Esta situación sería idéntica a ojos del observador si se produjera en el espacio, fuera de la influencia de cualquier objeto másico.

La conclusión obtenida es clara: Existe un observador para el cual, en situaciones puntuales, es imposible determinar si se encuentra dentro de la influencia de un campo gravitatorio o si se encuentra en un entorno no inercial acelerado.

Este principio trae como consecuencia que los sensores inerciales no pueden determinar la gravedad, sino solo las fuerzas contrarias que se oponen a ella. A continuación se dará una idea muy básica de un modelo gravitacional equiparable en precisión con los utilizados en las mediciones de los sensores inerciales.

1.1.2 Modelo de gravedad de un sistema de navegación inercial

Como hemos dicho, debido a que los sistemas de navegación inercial, y por lo tanto los sensores inerciales, trabajan en un entorno con aceleraciones gravitacionales imposibles de medir pero imposibles de ignorar, se hace necesario el desarrollo de un modelo teórico de la gravedad que refleje de manera fiable la influencia de la misma en las mediciones de los sensores. Existen numerosos modelos gravitacionales de distinta complejidad. La complejidad del modelo usado dependerá de la fiabilidad necesaria para la función que vaya a realizarse. El principal modelo gravitacional es el EGM96, siglas de Earth Gravitational Model 1996, desarrollado por la NASA, la *National Imagery and Mapping Agency* y la Universidad de Ohio. Este modelo cuenta con más de 130.000 coeficientes que conforman el modelo gravitatorio más preciso de los desarrollados hoy en día. Evidentemente, estos modelos sobrepasan las necesidades de los sistemas inerciales, bastando para ellos modelos más sencillos basados en las ideas expresadas a continuación:

Se considera la gravedad como una aceleración constante de valor igual a 9,80665 metros por segundo al cuadrado que apunta siempre “hacia abajo”, entendido esto como que en el entorno local será siempre perpendicular al plano tangente a la superficie terrestre y apuntando hacia el centro de la tierra. Puede añadirse a este apartado una corrección de dicho valor en función de la latitud. Esta corrección se hace necesaria debido a que la tierra no es perfectamente esférica, y por lo tanto la distancia de su superficie al centro de su masa varía en función de la latitud. Por lo tanto, si incluimos este parámetro, el valor de la gravedad quedaría definido mediante la siguiente expresión:

$$g = g^{45} - \frac{1}{2}(g^{POLOS} - g^{ECUADOR}) \cos\left(\frac{2 \text{ lat } \pi}{180}\right)$$

Donde:

- gpolos: 9.832 ms²
- g45: 9.806 ms²
- geccuador: 9.780 ms²

Basándonos en este modelo obtenemos unos valores de la aceleración de la gravedad que cumplen con las exigencias necesarias para el funcionamiento de los sistemas de navegación inercial. En las explicaciones que se desarrollan a lo largo del trabajo debe entenderse como fuerza o aceleración de la gravedad a la obtenida a partir de modelos gravitacionales como el explicado.

1.2 Sensores inerciales: Acelerómetros

Un acelerómetro consiste en un dispositivo formado por una masa M conectada a una carcasa mediante dos muelles o resortes. Existe un estado de reposo en el cual ambos resortes ejercen una determinada fuerza sobre la masa M igual y contraria. Si una fuerza actúa sobre el acelerómetro, proporcionándole una aceleración a en una dirección paralela a la del eje de ambos muelles, la masa M se desplazará hacia el lado opuesto al de aplicación de la fuerza debido a la inercia por mantener su estado de reposo, y este desplazamiento será proporcional a la aceleración sufrida. Si se calibra dicho estado de reposo como un estado en la que la aceleración es igual a cero, y se calibra igualmente el desplazamiento de la masa M con respecto a las aceleraciones sufridas en la dirección del eje de los muelles y en ambos sentidos, tendremos un dispositivo capaz de medir la aceleración. En la imagen 19 se muestra una ilustración de un acelerómetro.

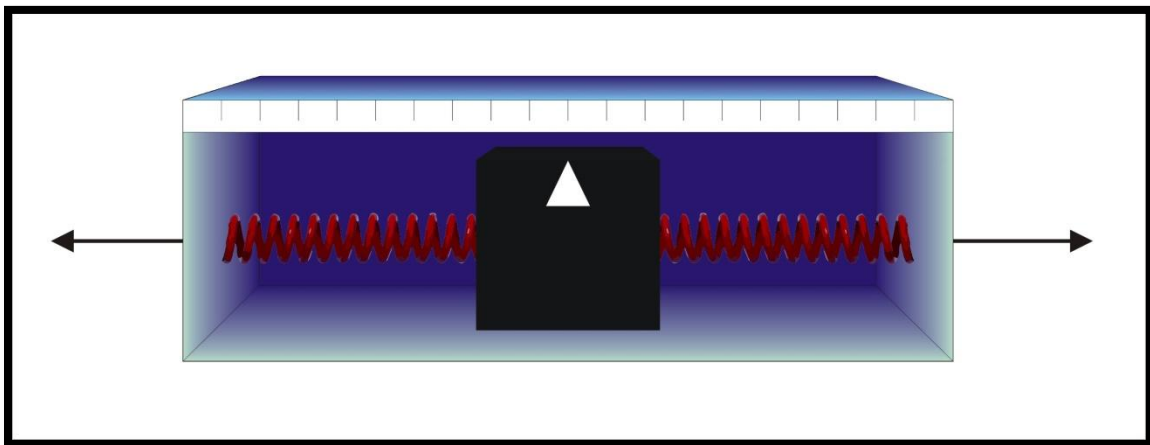


Imagen 19: Ilustración de un acelerómetro junto con el eje de mediciones.

Fuente: Elaboración propia.

Pero la aceleración y la fuerza aplicada al acelerómetro deben considerarse dentro del entorno terrestre, con una gravedad, según un modelo gravitatorio, que produce una aceleración constante de 9,8 metros por segundo en dirección vertical y sentido hacia abajo. La masa M está siempre sometida a dicha fuerza, por lo que si el acelerómetro fuera calibrado en un entorno de gravedad cero y trasladado posteriormente a la tierra, estando el mismo en reposo daría una lectura positiva de aceleración. Por esto, se crea el concepto de fuerza específica f . Esta fuerza específica f será la medida que proporcione el acelerómetro, y se calculara como:

$$f = a - g$$

De esta manera se tiene en cuenta la aceleración constante de la gravedad y se anula a efectos de realizar los cálculos necesarios.

Una vez que la lectura del acelerómetro nos proporciona una medida de las aceleraciones sufridas debido a fuerza externas que no sean la de la gravedad, debe tenerse en cuenta que un acelerómetro solo mide aceleraciones producidas en direcciones paralelas a la de los ejes de sus muelles. Es decir, un acelerómetro cuyos muelles se encuentren colocados en el eje Norte-Sur solo medirá aceleraciones en dicho eje, pero no aceleraciones verticales ni en el eje Este-Oeste. Por lo tanto, para obtener mediciones tridimensionales de las aceleraciones, se hace necesario la combinación de tres acelerómetros, que componen las denominadas triadas de acelerómetros. Estas triadas están compuestas por tres acelerómetros cuyos ejes son ortogonales, lo que les permite determinar las aceleraciones en todas las direcciones.

1.3 Sensores inerciales: Giróscopos

El cálculo del movimiento de un cuerpo en un entorno tridimensional hace necesario conocer no solo los movimientos de traslación sino también los de rotación. En los sistemas de navegación inercial, estas medidas son llevadas a cabo a través de giróscopos. Un giróscopo se define como un dispositivo capaz de medir velocidades angulares. Existen en la actualidad numerosos tipos de giróscopos, incluyendo desde los electro mecánicos hasta los ópticos, siendo los primeros los más comunes a bordo.

Este tipo de sensor inercial se ve igualmente afectado por encontrarse situado en la

superficie terrestre. Si las mediciones de los acelerómetros se ven afectadas por la gravedad terrestre, las mediciones de las rotaciones por parte del giróscopo se ven afectadas por la rotación terrestre, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de utilizar las medidas de estos sensores dentro del sistema.

Puesto que la navegación se desarrolla en un entorno tridimensional, y que cada giróscopo es capaz de medir rotaciones en una dimensión, es necesario contar con una triada de giróscopos para las mediciones de las rotaciones sufridas por el buque.

1.4 Mediciones realizadas por una triada de acelerómetros

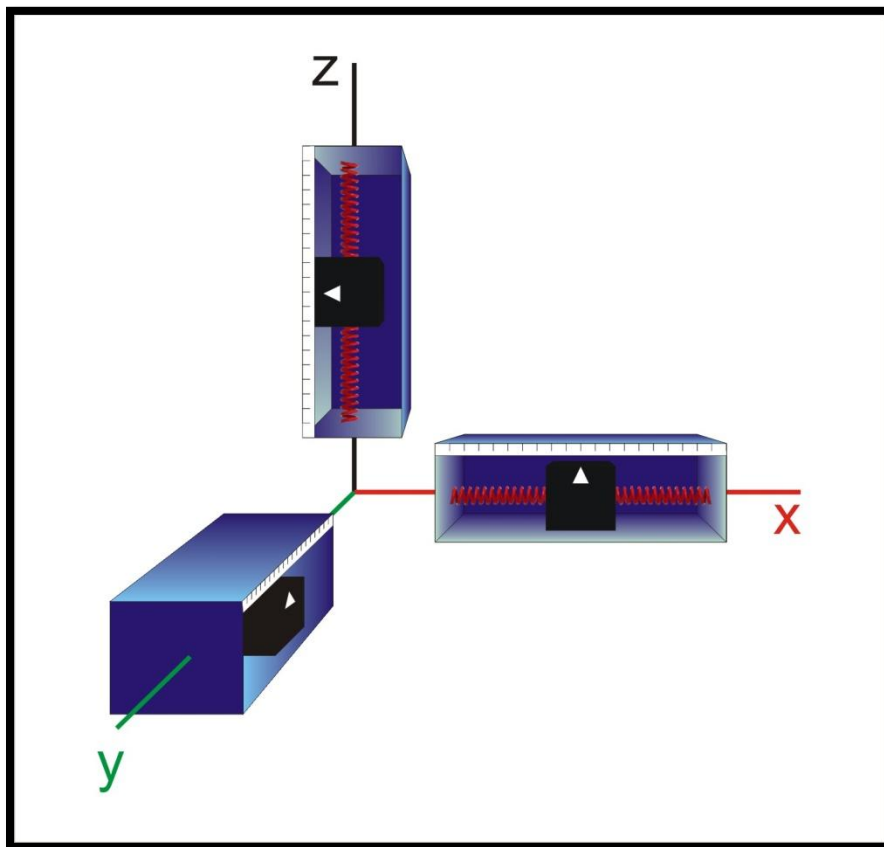


Imagen 20: Ilustración de una triada de acelerómetros.

Fuente: Elaboración propia.

Supongamos una triada de acelerómetros, es decir, tres acelerómetros situados de tal manera que sus ejes sean paralelos a los ejes ortogonales X, Y y Z, tal y como se muestra en la imagen 20, colocados a bordo de un buque con velocidad constante e igual a cero y que en un principio no sufre ningún movimiento de arfada, balance o

cabeceo. El eje X coincidiría con la línea de crujía del buque, el eje Y atravesaría el buque de banda a banda perpendicular a crujía mientras que el eje Z sería perpendicular al plano formado por el eje X y el Y. De esta manera, tendríamos que el acelerómetro situado en el eje X mediría las aceleraciones sufridas en la dirección avante-atrás, pero como hemos dicho que el buque tiene velocidad constante e igual a cero, estas aceleraciones no existen. El acelerómetro situado en el eje Y mediría las aceleraciones transversales babor-estribor, pero debido al mismo motivo, estas aceleraciones tampoco existen en el ejemplo. Sin embargo, el acelerómetro situado en el eje Z, aunque el buque no sufra movimientos de arfada y por lo tanto no se vea afectado por fuerzas verticales exteriores, existe una fuerza que estará siempre presente, y que por lo tanto será recogida por este acelerómetro. Esta fuerza es la gravedad g , y este último acelerómetro será el único que la recoja en sus mediciones. Por lo tanto, las medidas serán las siguientes:

Fuerza registrada en el acelerómetro X = 0

Fuerza registrada en el acelerómetro Y = 0

Fuerza registrada en el acelerómetro Z = g

Supongamos ahora que, por poner un ejemplo, lastramos el buque de manera que queda con un asiento apopante de cuatro metros, lo que supone un ángulo de la quilla con la horizontal de 10 grados, al que denominaremos ángulo de cabeceo (A_c). El resto de condiciones no varía, es decir, el buque sigue sin experimentar movimiento alguno. Los acelerómetros se encuentran situados en el mismo lugar con respecto al buque, pero no con respecto a la dirección en la que se ve aplicada la fuerza g . Analizando cada acelerómetro de igual manera que en la situación anterior obtenemos que el acelerómetro situado en el eje X ahora tiene un ángulo con la horizontal igual al de la quilla, es decir, de 10 grados. Al tener su posición una componente vertical, la fuerza g afecta a las mediciones de dicho acelerómetro, que serán en este caso distintas de cero. En el caso del acelerómetro situado en el eje Y, habrá sufrido un movimiento de rotación sobre el eje Y, pero su ángulo con la horizontal seguirá siendo igual a cero, y por lo tanto la gravedad no afectará a sus medidas. Por último, el acelerómetro situado en el eje Z ha sufrido una traslación de manera que su ángulo con la horizontal, que antes era

de 90 grados ahora se ve disminuido a 80 grados (90 menos el ángulo producido por el asiento), por lo que la fuerza g se verá recogida en menor medida en las mediciones del acelerómetro. Expresadas matemáticamente, las medidas de cada acelerómetro serán:

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } X = g \sin (Ac)$$

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } Y = 0$$

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } Z = g \cos (Ac)$$

Como último ejemplo, supongamos que ahora lastramos los tanques de estribor, de manera que, además del asiento de cuatro metros, el buque tiene ahora una escora de 20 grados a estribor. A este ángulo lo denominaremos ángulo de escora (Ae). El buque sigue sin experimentar movimientos. En un último análisis de la condición de los acelerómetros observamos que el acelerómetro situado en crujía, es decir, en el eje X, tiene el ángulo Ac explicado en el ejemplo anterior, pero este último movimiento de escora no ha afectado a su posición, puesto que lo único que ha hecho es girar sobre el eje X. Por lo tanto, su medición será la misma que en el ejemplo anterior. Si atendemos ahora al acelerómetro situado en el eje Y observaremos que este movimiento si ha provocado una variación de la posición, la cual forma un ángulo con la horizontal de 20 grados, ángulo igual al de escora, y por lo tanto la gravedad g afectará ahora a sus mediciones. Por último, la posición del acelerómetro situado en el eje Z es la que más afectada se ve, puesto que le afectan tanto el movimiento anterior como este. Tras la escora, este acelerómetro ha sufrido el desplazamiento de 10 grados con respecto a la vertical y hacia la popa debido al asiento apopante y ahora un desplazamiento de 20 grados con respecto a la vertical hacia estribor, por lo que la gravedad afectará de manera distinta a sus mediciones. Expresadas matemáticamente, las mediciones de cada acelerómetro serán:

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } X = g \sin (Ac)$$

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } Y = - g \cos (Ac) \sin (Ae)$$

$$\text{Fuerza registrada en el acelerómetro } Z = g \cos (Ac) \cos (Ae)$$

Esta última condición, que será en la que se encuentre el buque la mayoría de las veces, puesto que durante la navegación siempre se sufrirán movimientos de balance o cabeceo,

aunque sean pequeños, es la que debe considerarse a la hora de interpretar las mediciones de la triada de acelerómetros en movimiento. En todos los ejemplos anteriores hemos fijado la condición de que el buque no experimentaba movimientos ni de traslación ni de rotación. Pero el sistema trabajando en un entorno real si experimentará movimientos, que son los que debe determinar mediante la medición de fuerzas y aceleraciones, por lo que debe entenderse las medidas de un acelerómetro como la combinación de las fuerzas de la gravedad explicadas y las fuerzas exteriores sufridas por el buque.

Por lo tanto, las fuerzas exteriores ejercidas sobre el buque se recogerán en las medidas de los acelerómetros de igual manera que la gravedad, es decir, descompuestas en sus componentes paralelas a los ejes de los acelerómetros. Considero necesario recalcar que las fuerzas de la gravedad registradas deben entenderse como la combinación de las fuerzas opuestas a la gravedad junto con un modelo gravitatorio teórico, puesto que como ya dijimos, los sensores inerciales no pueden medir la gravedad. Puesto que el sistema precisa únicamente de las aceleraciones provocadas por fuerzas externas que afecten al movimiento del buque, debe descontarse de la fuerza o aceleración total medida (F_t) por cada acelerómetro el efecto de la fuerza de la gravedad. Esto se realiza mediante las siguientes operaciones:

$$\text{Fuerza registrada por el acelerómetro X} = F_t - g \sin(Ac)$$

$$\text{Fuerza registrada por el acelerómetro Y} = F_t - g \cos(Ac) \sin(Ae)$$

$$\text{Fuerza registrada por el acelerómetro Z} = F_t - g \cos(Ac) \cos(Ae)$$

De estas expresiones puede deducirse que para poder calcular la fuerzas que afectan al movimiento del buque y por lo tanto las aceleraciones, debe conocerse en todo momento el ángulo de escora y el ángulo de cabeceo del buque. Estas mediciones, efectuadas por los giróscopos, serán necesarias para el proceso de transformación de las mediciones de los acelerómetros en el campo local a valores aplicables al campo geográfico. Esta transformación será explicada detalladamente más adelante.

1.5 Mediciones realizadas por una triada de giróscopos

Para el análisis de las mediciones realizadas por una triada de giróscopos usaremos un

ejemplo similar al utilizado en la explicación de los acelerómetros. Supongamos un buque en cuyo puente tenemos una triada de giróscopos situados en tres ejes ortogonales denominados X, Y y Z, tal y como se muestra en la imagen 21, colocados con respecto al buque de la misma manera que los del ejemplo anterior. Supongamos también que cada uno de los giróscopos mide rotaciones del plano perpendicular al eje en el cual se encuentra situado, por lo que el giróscopo X será el encargado de cuantificar el movimiento de balance, el giróscopo Y los movimientos de cabeceo y el giróscopo Z los cambios de rumbo. Pero al igual que en el ejemplo anterior, nuestro buque se encuentra en una posición de reposo, sin experimentar movimientos ni de traslación ni de rotación. En esta situación, las mediciones de los giróscopos dependerán de la posición geográfica del buque, encontrando tres casos distintos. Estos tres casos se ilustran en la imagen 22, mostrada en la página 54.

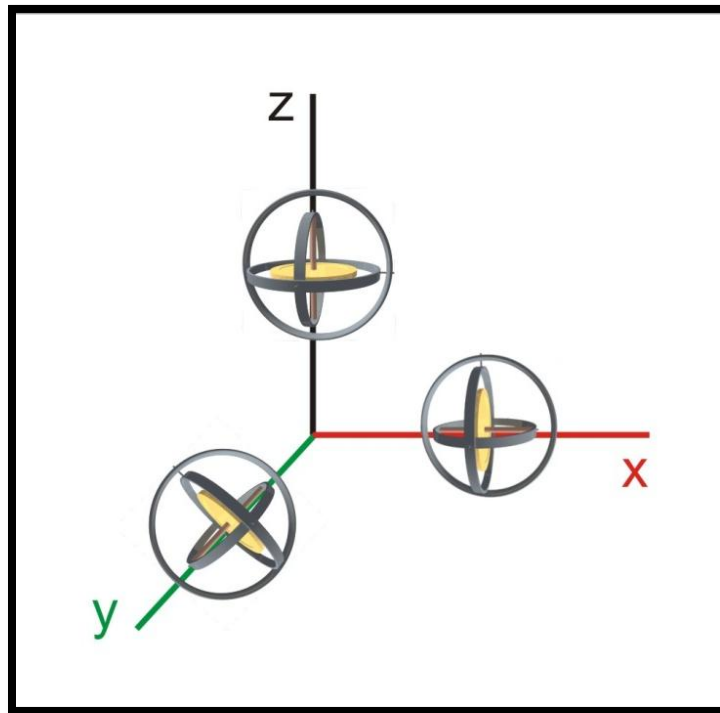


Imagen 21: Triada de giróscopos

Fuente: Elaboración propia

La primera situación en la que situaremos el buque, y por lo tanto la triada de giróscopos es en el polo norte. Situados en este punto, el giróscopo recogerá los movimientos de rotación sufridos por el buque debido a la rotación terrestre. Supongamos también que los tres ejes ortogonales están alineados con el campo

geográfico, es decir, con el eje X apuntando hacia el este. En este caso, el movimiento de rotación terrestre ocurre sobre el eje Z, y por lo tanto será el giróscopo situado en dicho eje el que recoja en sus mediciones dicho movimiento. Así, si denominamos a la velocidad angular de rotación de la tierra ω_e , las medidas registradas por cada uno de los giróscopos serán:

Velocidad angular registrada por el giróscopo X = 0

Velocidad angular registrada por el giróscopo Y = 0

Velocidad angular registrada por el giróscopo Z = ω_e

Esta situación daría los mismos resultados si en vez de estar situado el buque en el polo norte estuviera situado en el polo sur, puesto que el movimiento de rotación terrestre seguiría sucediendo sobre el eje Z.

En cambio, si en vez de situar nuestro buque en cualquiera de los polos lo situamos en un punto de longitud cualquiera pero de latitud igual a cero, la situación cambiaría. Orientando la triada de la misma manera que en el polo, es decir, el eje X apuntando al este, y por lo tanto el eje Y apuntando al norte y el eje Z perpendicular a la superficie terrestre, tendríamos que ahora el movimiento de rotación terrestre ocurriría sobre el eje Y y no sobre el Z como en la situación anterior. Por lo tanto, las mediciones registradas anteriormente por el giróscopo Z serán ahora registradas por el giróscopo Y.

Velocidad angular registrada por el giróscopo X = 0

Velocidad angular registrada por el giróscopo Y = ω_e

Velocidad angular registrada por el giróscopo Z = 0

Por último, si situamos la triada en un punto de latitud distinta de 0 o 90 grados, el giróscopo X será el único que no recoja medición alguna puesto que su eje sigue siendo perpendicular al eje de rotación de la tierra, pero tanto el eje Z como el Y sí experimentan rotación ya que sus ejes forman un ángulo menor de 90 grados con el eje de rotación de la tierra. Así, las mediciones recogidas por los giróscopos serán:

Velocidad angular registrada por el giróscopo X = 0

Velocidad angular registrada por el giróscopo Y = $\omega e \cos(\text{latitud})$

Velocidad angular registrada por el giróscopo Z = $\omega e \sin(\text{latitud})$

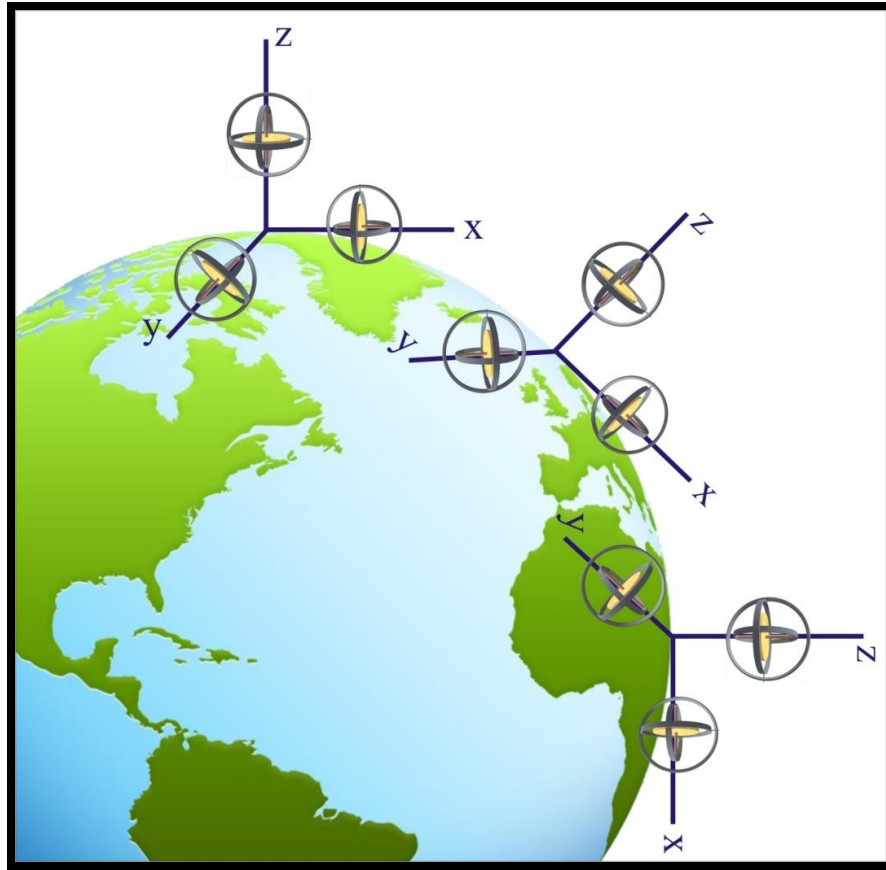


Imagen 22: Posición de los ejes de la triada en función de la latitud:

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, cuando se procesen las mediciones obtenidas por la triada de giróscopos en un sistema de navegación inercial debe tenerse en cuenta que en estas mediciones están recogidos dos componentes. El primero, el aportado por la rotación terrestre y que depende, como hemos explicado, de la latitud en la que se encuentre el buque, y el segundo el aportado por los movimientos propios de balance, cabeceo y guiñada, que son los que se necesita conocer para el funcionamiento del sistema.

1.6 Características de los sensores inerciales

Para asegurarse de que un sensor inercial es apto para su aplicación en estos sistemas, debe comprobarse que cumple con una serie de características importantes para un

funcionamiento correcto que ofrezca mediciones de alta calidad y fiabilidad. Estas cualidades son:

- Repetibilidad: Se define como la capacidad de un sensor de ofrecer un mismo resultado para medidas intermitentes de un parámetro que permanece constante.
- Estabilidad: Se define como la capacidad de un sensor de ofrecer un mismo resultado al medir de forma continua y durante un determinado periodo de tiempo un parámetro que permanece constante.

Por otro lado, encontramos la característica contraria e indeseada en un sensor inercial, denominada *Drift* o desvío, que se describe como el cambio en la respuesta del sensor al medir durante un periodo de tiempo un parámetro que permanece constante. Este error en el sensor, junto otra serie de fallos, producen una serie de inexactitudes en las mediciones de los sensores.

1.6.1 Errores en los sensores inerciales

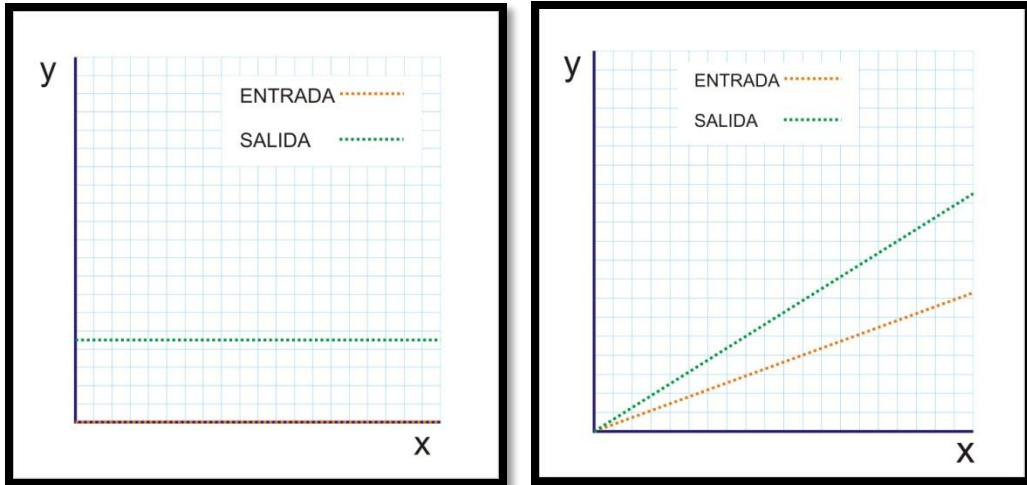
Como se comentó en el apartado anterior, los sensores inerciales se ven afectados por una serie de fallos que afectan a la calidad de las mediciones. Estos fallos deben minimizarse mediante un diseño, construcción y mantenimiento correcto de los sensores, de manera que pueda siempre confiarse en que las mediciones determinadas por los mismos sean fiables. A continuación se irán explicando los errores más comunes que se presentan tanto en los giróscopos como en los acelerómetros, divididos en dos grupos, denominados errores sistemáticos y errores aleatorios.

1.6.1.1 Errores sistemáticos

Los errores incluidos en este grupo son aquellos que pueden ser compensados mediante una correcta calibración. Los más comunes son los siguientes:

1.6.1.1.1 Desvío sistemático

Es un error presente en todos los acelerómetros y giróscopos, puesto que una calibración perfecta es imposible en la práctica. Se define como la respuesta del sensor cuando la entrada es nula o igual a cero.



Imágenes 23 y 24: Errores de desvío sistemático (Izda) y de factor de escala (Dcha)

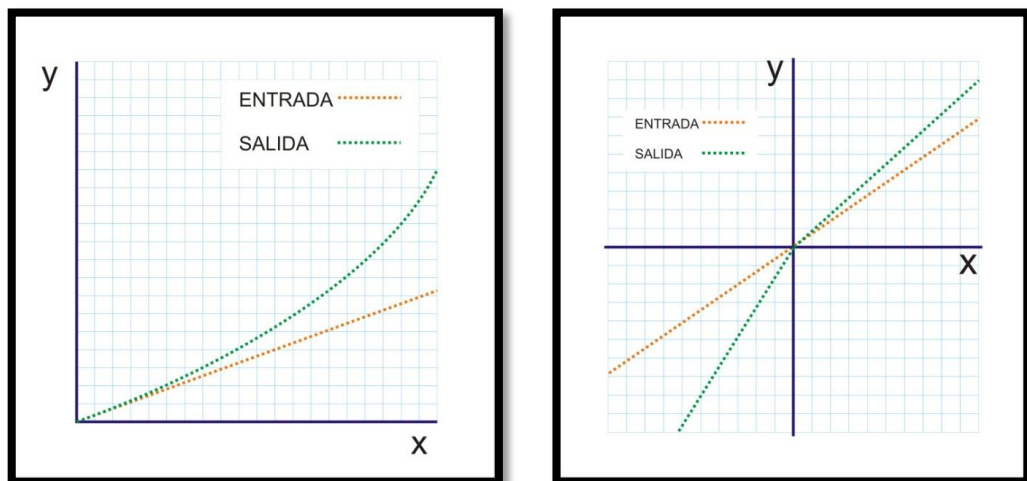
Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.1.2 Factor de escala

Es el error producido por un error en la escala del sensor. Viéndolo de manera esquemática, podría decirse que este error se produce cuando a una entrada de 1 le sucede una salida de 1,1. A mayor fuerza o velocidad angular medida mayor es el error, puesto que este error en la escala va acumulándose.

1.6.1.1.3 Error de no linealidad

Existe cuando a un cambio linear de la entrada del sensor le sucede una salida no lineal, ya sea menor o mayor que la entrada.



Imágenes 25 y 26: Errores de no linealidad (Izda) y factor de escala de distinto signo (Dcha)

Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.1.4 Factores de escala de distinto signo

Este error es una combinación de dos errores por factor de escala, producido uno en los valores de entrada positivos y otro en los negativos, con diferentes valores de error cada uno.

1.6.1.1.5 Zona muerta

Es el error producido cuando existe un rango de valores de entrada para los que no existe salida o esta es igual a cero.

1.6.1.1.6 Error de cuantificación

Este error es producto de que el sensor tiene una sensibilidad mínima la cual debe superarse para que un cambio en la señal de entrada produzca un cambio en la señal de salida. Este error puede verse de forma sencilla en una báscula cuyas mediciones solo recojan hasta las décimas de kilogramo. A un aumento lineal de la carga, le correspondería un aumento escalonado de la señal de salida de la báscula, puesto que esta expresaría la misma salida para un peso de 0 gramos que para un peso de 70, produciéndose el cambio en la salida solo al superar la carga los 100 gramos.

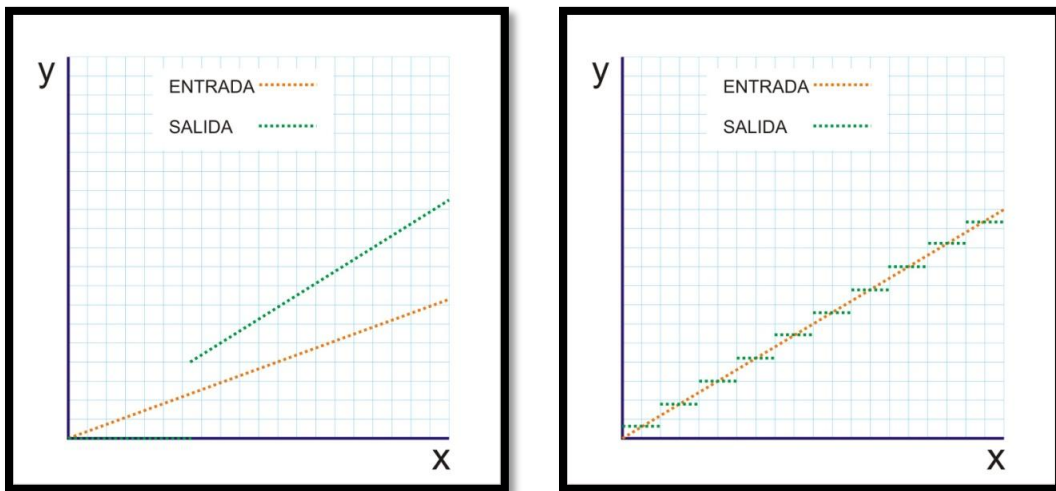


Imagen 27 y 28: Errores de zona muerta (Izda) y de cuantificación (Dcha).

Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.1.7 Errores de no ortogonalidad

Este error se produce en las triadas tanto de giróscopos como de acelerómetros cuando alguno de los tres ejes no cumple con la ortogonalidad necesaria para el buen

funcionamiento del sistema. Es un error que siempre estará presente, puesto que una ortogonalidad perfecta es imposible en la práctica, pero debe intentar reducirse mediante una calibración de calidad.

1.6.1.1.8 Errores de desalineación

Son los errores producidos cuando los ejes de los giróscopos o acelerómetros no coinciden con el eje ortogonal correspondiente. Al igual que el error anterior, estará siempre presente en mayor o menor medida, y su minimización se consigue mediante una correcta calibración.

1.6.1.2 Errores aleatorios

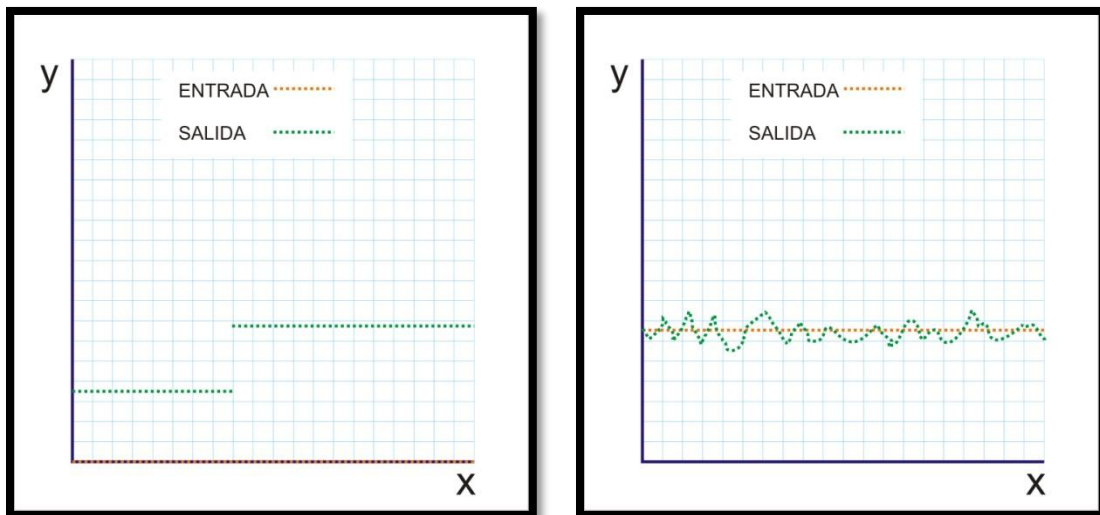
Son errores relacionados con la variación aleatoria de los factores que describen los errores sistemáticos. Los más comunes son los siguientes.

1.6.1.2.1 Variación aleatoria del desvío

Se produce cuando el desvío sistemático varía para cada medición del sensor.

1.6.1.2.2 Deriva en el desvío

Este error se define como la variación aleatoria del desvío durante una misma medición del sensor (Imagen 29).



Imágenes 29 y 30: Errores de deriva del desvío (Izda) y ruido (Dcha)

Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.2.3 Inestabilidad del factor de escala

Es un error que se produce cuando el factor de escala explicado en los errores sistemáticos varía aleatoriamente entre una medición del sensor y otra.

1.6.1.2.4 Ruido

Este error es el producido por una alteración aleatoria de la señal que se produce en todas las frecuencias (Imagen 30). Puede ser causado por la interacción electromagnética con fuentes de energía o por los conductores que transportan las señales del sensor.

3 Unidad de medida inercial en navegación en una, dos y tres dimensiones

Los giróscopos y los acelerómetros componen, como se ha explicado, la base de un sistema de navegación inercial. Pero deben combinarse entre ellos para obtener un sistema capaz de determinar las aceleraciones y rotaciones en un entorno tridimensional. Concretamente es necesario una combinación de tres acelerómetros y tres giróscopos para conseguirlo, y ese conjunto es la parte fundamental de las denominadas IMU (*Inertial Measurement Unit*) o unidad de medida inercial.

2.1 Unidad de medida inercial

Las unidades de medida inercial IMU están formadas por dos triadas ortogonales de sensores inerciales, una de acelerómetros y otra de giróscopos, las cuales se encuentran dispuestas de manera que sus ejes X, Y y Z son paralelos, compartiendo ambas triadas el origen. Como ya sabemos, la triada de acelerómetros mide movimientos lineales en los tres ejes ortogonales mientras que la triada de giróscopos mide rotaciones igualmente en los tres ejes ortogonales. A parte de las triadas de sensores, las IMU cuentan con dispositivos electrónicos que permiten extraer las mediciones de los sensores y transformarlas en datos útiles para el sistema de procesado de información.

Las IMU deben contar con tres acelerómetros y tres giróscopos debido a que están diseñados para funcionar en un entorno tridimensional. La explicación del funcionamiento directamente en este entorno puede resultar difícil, por lo que se

explicarán las unidades IMU necesarias para la navegación en una y dos dimensiones previamente, detallando las mediciones realizadas por cada sensor, para que posteriormente resulte más sencillo la explicación del funcionamiento en el entorno tridimensional.

2.1.1 Navegación en una dimensión

La navegación en una dimensión es el caso más sencillo al que se puede aplicar un sistema de navegación inercial. Supongamos un buque navegando en un plano teórico en el que su movimiento está restringido a un solo eje, es decir, su único movimiento posible es adelante o atrás. Este buque estaría navegando en un entorno unidimensional, por lo tanto el único movimiento determinable es el que se produce a lo largo del eje X paralelo al movimiento del buque.

En este caso, la unidad de medida inercial necesaria para abarcar todas las mediciones necesarias para determinar el movimiento del buque queda bastante reducida. Puesto que el movimiento del buque queda restringido a un solo eje, es decir, solo se moverá en línea recta, no se pueden producir rotaciones que afecten a la posición del buque (el buque no puede caer a una u otra banda). Por lo tanto, la aplicación de un giróscopo a este caso no tiene sentido, puesto que este indicaría siempre una medida angular igual a cero. En el caso de los acelerómetros, no serán necesarios los encargados de determinar las aceleraciones verticales ni las laterales, puesto que estas no pueden producirse, por lo que solo sería necesario el acelerómetro encargado de determinar las aceleraciones existentes en la dirección del movimiento. Por lo tanto, la unidad de medida inercial quedaría reducida a un único acelerómetro cuyo eje de medición estuviera situado paralelo al eje de movimiento del buque.

Este acelerómetro sería el encargado de determinar la velocidad y la posición del buque. Partiendo de una posición conocida X_0 y de una velocidad inicial V_0 , la velocidad del buque quedaría determinada mediante la integración de la salida del acelerómetro A como sigue:

$$V_t = \int (A_t + V_0) dt$$

Una segunda integración de la velocidad total V_t nos daría como resultado la posición X del buque:

$$X = \int V_t dt$$

$$X = \int (A_t + V_o) dt$$

$$X = \frac{A_t^2}{2} + V_o t + X_o$$

2.1.2 Navegación en dos dimensiones

La aplicación de los sensores inerciales a una navegación en dos dimensiones resulta bastante más compleja que en el caso de la navegación unidimensional. Lo primero que debe tenerse en cuenta es la existencia de dos “entornos” o campos a los que denominaremos campo local y campo geográfico. El campo local es el plano paralelo a la cubierta del buque, y que se mueve con ella, mientras que el campo geográfico es el plano de la superficie terrestre, en el cual se desea posicionarse. Las medidas de los sensores inerciales se realizan en el campo local, puesto que es donde se encuentran situados, pero estas medidas deben ser aplicadas dentro del campo geográfico. Esto hace necesario un proceso de transformación de estas medidas. Esto puede realizarse de dos maneras, y según cuál sea la utilizada, encontrados los siguientes tipos de sistemas inerciales:

- ✓ **Sistemas estabilizados:** En estos sistemas, la transformación de las medidas obtenidas a medidas aplicables a un entorno geográfico se consigue mediante el montaje de toda la unidad IMU sobre una suspensión cardán. De esta manera, el sistema queda siempre alineado con el campo o ambiente geográfico y las medidas obtenidas son válidas para el cálculo de la posición. En estos sistemas, las mediciones de los acelerómetros son integrados directamente para obtener velocidad y posición, pero la complejidad de las suspensiones y su alto coste hacen que sea el sistema menos utilizado.
- ✓ **Sistemas fijos:** Estos sistemas, al contrario que los anteriores, se encuentran montados sobre una superficie fija que experimenta los movimientos de balance

y cabeceo del buque. Estos movimientos son medidos por los giróscopos y procesados un ordenador que simula la rotación de la plataforma en una suspensión cardán, de manera que los sensores son virtualmente trasladados desde el entorno local al geográfico. Los giróscopos miden continuamente los movimientos para mantener actualizado el algoritmo mediante el cual ocurre dicha transformación. En estos sistemas, las mediciones de los sensores inerciales no son integradas directamente, sino que han de pasar por el proceso de transformación para ser posteriormente procesadas.

Además, la navegación en dos dimensiones permite más movimientos que la navegación unidimensional. En realidad, los movimientos experimentados por un buque pueden considerarse, sin que esto conlleve grandes errores, que ocurren únicamente en dos dimensiones, puesto que los movimientos verticales son despreciables. Pese a esto, los equipos instalados a bordo de los buques cuentan con sistemas diseñados para trabajar en entornos tridimensionales, puesto que son utilizados también para la realización de maniobras en las que la situación vertical del buque a causa del oleaje pueda tener importancia.

En el entorno de dos dimensiones, debe controlarse no solo el movimiento adelante y atrás, sino también el movimiento de deriva provocado por fuerzas transversales y el movimiento de rotación que implica un cambio de rumbo. Por lo tanto, puesto que los posibles movimientos ocurren en referencia a dos ejes, a los que denominaremos X e Y, son necesarios dos acelerómetros para la determinación de las aceleraciones en cada uno de los ejes. Además, puesto que en este entorno son posibles los movimientos de rotación, es necesario un giróscopo que detecte los movimientos de rotación en la dirección perpendicular al plano formado por los ejes X e Y. Esta rotación se expresa en forma de un ángulo definido como azimut (A), que expresa la desviación del eje X con respecto al norte.

Las aceleraciones determinadas por los acelerómetros están medidas respecto a los ejes X e Y, pero el sistema de procesamiento necesita para situarse las aceleraciones sufridas en referencia a los ejes norte-este, por lo que las medidas obtenidas deben operarse de la siguiente manera:

$$a_{ESTE} = a_y \sin(a) + a_x \cos(a)$$

$$a_{NORTE} = a_y \cos(a) - a_x \sin(a)$$

Una vez obtenida la aceleración en referencia a los puntos norte y este, podemos establecer la velocidad integrando como se muestra a continuación:

$$V_{ESTE} = \int (a_y \sin(a) + a_x \cos(a)) dt$$

$$V_{NORTE} = \int (a_y \cos(a) - a_x \sin(a)) dt$$

E integrando las velocidades obtenemos posiciones:

$$X_{ESTE} = \int \int (a_y \sin(a) + a_x \cos(a)) dt$$

$$X_{NORTE} = \int \int (a_y \cos(a) - a_x \sin(a)) dt$$

Una vez conocida la diferencia de posición tanto en el eje E como en el N, deben sumarse ambas componentes para obtener la diferencia de posición total. Todo esto, como puede deducirse de las operaciones explicadas, depende del conocimiento previo del azimut A , el cual se obtiene a partir de las mediciones de velocidad angular (ω) proporcionadas por el giróscopo. Para el cálculo explicado en este apartado se desestiman los errores producidos por la rotación terrestre. De esta manera, las medidas de velocidad angular son tratadas de la siguiente manera para obtener el ángulo A :

$$A(t) = \int \omega_{GYRO} dt + A_0$$

Resumiendo, la IMU necesaria para navegar en un entorno de dos dimensiones está compuesta por dos acelerómetros situados en ejes perpendiculares y que forman el plano del movimiento y un giróscopo cuyo eje sea perpendicular a dicho plano y sea capaz de medir variaciones del rumbo o dirección del vehículo o buque.

2.1.3 Navegación en tres dimensiones

La navegación en tres dimensiones requiere una MU completa conformada por una

triada de acelerómetros encargados de medir las aceleraciones sufrida en los tres ejes ortogonales, es decir, aceleraciones adelante y atrás, transversales y verticales, así como una triada de giróscopos capaces de determinar las rotaciones tanto de guiñada como de cabeceo y balance. Esta navegación es la que se produce realmente en los sistemas de navegación inercial, pese a que, como hemos dicho, en un sistema inercial de posicionamiento a bordo de un buque los movimientos verticales son casi despreciables.

Las mediciones que realizan los giróscopos y acelerómetros en una navegación tridimensional se han explicado en los apartados dedicados a las mediciones obtenidas por las triadas de los correspondientes sensores. El objetivo final de estas mediciones no es otro que ofrecer unos vectores de movimiento en las tres dimensiones del campo local del buque, es decir, los movimientos adelante-atrás, de deriva y de arfada, y unos valores angulares que permitan aplicar dichos movimientos con respecto al campo local a un campo geográfico con el que puede o no coincidir. Mediante esta transformación y tras procesar las mediciones a través del algoritmo de integración de las aceleraciones se obtendrá una variación de posición con respecto al punto de partida, que es lo que se pretende conseguir con estos sistemas.

Todo esto se realiza mediante una combinación de todos los elementos que se han ido explicando en los anteriores apartados, los cuales se relacionan tal y como se muestra en el siguiente diagrama de bloques de la imagen 31.

En este diagrama:

- ✓ G es la aceleración gravitacional estimada en función de la posición.
- ✓ POS_{nav} es la posición geográfica estimada del buque en el campo geográfico.
- ✓ VEL_{nav} es la velocidad estimada del buque en el campo geográfico.
- ✓ ACC_{nav} es la aceleración estimada del buque en el campo geográfico.
- ✓ ACC_{sensor} es la aceleración estimada en el campo local.
- ✓ C_{sensor} es la matriz que permite la transformación de los valores obtenidos en el campo local a valores útiles en el campo geográfico.
- ✓ Ω_{sensor} es la velocidad angular estimada del buque en el campo local.

- ✓ Ω_{nav} es la velocidad angular estimada del buque en el campo geográfico.

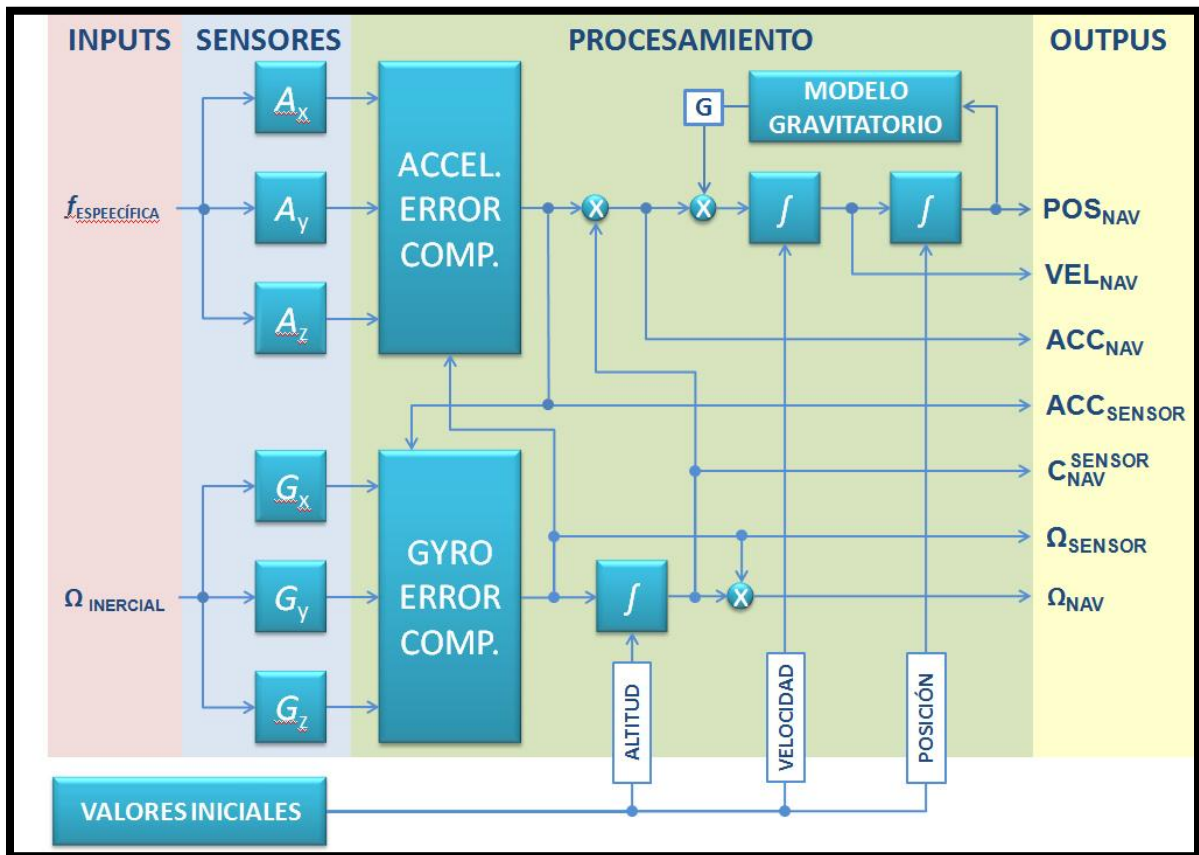


Imagen 31: Diagrama de bloques de un sistema de navegación inercial.

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama pueden diferenciarse tres zonas o pasos mediante los cuales va avanzando el proceso de cálculo de los valores de salida. La primera de ellas es la denominada “*INPUTS SENSORS*”. Como podemos ver, encontramos las entradas aportadas por los tres acelerómetros situados en los ejes X, Y y Z, cuyas mediciones se habrán obtenido tal y como se explica en el apartado dedicado a las mediciones de una triada de acelerómetros. Por otro lado, las entradas de los giróscopos situados igualmente en los ejes X, Y y Z que aportan las mediciones de velocidad angular necesarias. Todas estas entradas pasan por una serie de procesadores que compensan los errores sufridos por los sensores para ser posteriormente procesadas y conseguir las salidas del sistema. Una vez estos datos han sido procesados pasan a la siguiente zona, denominada “*PROCESSING*”, en la cual se realizan el procesamiento más importante

de la información y que da como resultado los datos expuestos en la tercera y última zona denominada “*OUTPUTS*”. A continuación se irá explicando el proceso de obtención de cada uno de los parámetros obtenidos como resultados del procesamiento de las entradas:

- ✓ **POSnav:** Las mediciones de los acelerómetros y giróscopos se combinan con las entradas de valores iniciales de altitud, velocidad y posición para obtener valores de aceleración en el campo geográfico. Estos valores son tratados en función del modelo gravitacional correspondiente e integrados dos veces, obteniendo así la posición estimada en el campo geográfico.
- ✓ **VELnav:** El proceso para la obtención de este parámetro es paralelo al anterior hasta llegado el punto de las dos integraciones finales. En este caso, los valores de aceleraciones en el campo geográfico solo deben integrarse una vez para obtener los valores de velocidades en el campo geográfico.
- ✓ **ACCnav:** El proceso para la obtención de las aceleraciones en el campo geográfico es igualmente paralelo al anterior hasta el punto de las dos integraciones. Puesto que lo que se desea son valores de aceleración, no es necesario ninguna integración.
- ✓ **ACCsensor:** Para la obtención de las aceleraciones estimadas en el campo local deben buscarse los valores que salen directamente de las mediciones de los acelerómetros.
- ✓ **Csensor:** La matriz de transformación, como ya explicamos, queda conformada con las mediciones de los giróscopos sobre las velocidades angulares. Como vemos en el diagrama, esta matriz se obtiene mediante la integración de los valores de velocidad angular medidos por los giróscopos en combinación con la entrada del valor inicial de altitud.
- ✓ **Ω sensor:** Los valores de velocidad angular del buque en el campo local se obtienen al buscar directamente las salidas de los giróscopos tras pasar por la compensación de errores.
- ✓ **Ω nav:** Los valores de velocidad angular del buque en el campo geográfico se

obtienen al combinar la matriz de transformación con las velocidades angulares en el campo local.

Con este diagrama se pretende integrar en un esquema todos los apartados explicados en esta parte del trabajo. Puede verse como el modelo gravitacional, las triadas de giróscopos y acelerómetros y los errores en estos sensores son parte fundamental del sistema, y que todos ellos se relacionan entre sí para alcanzar el objetivo final de ofrecer posición y velocidad del vehículo en el cual se encuentre instalado el sistema.

4 Fiabilidad y precisión de los sistemas de navegación inercial

Una vez que se han englobado todos los aspectos explicados durante este capítulo conformando una idea general de lo que supone un sistema de navegación inercial y de cómo se relacionan los elementos del sistema, debemos tratar la precisión y a fiabilidad que ofrecen estos sistemas a bordo de un buque que los utilice como medio de posicionamiento.

Evidentemente, la utilidad de un sistema de navegación inercial, así como la de cualquier otro sistema de posicionamiento, depende de la precisión de la posición obtenida y de la fiabilidad que este ofrezca. Un sistema de navegación inercial debe reunir ambas cualidades, pues no servirá un sistema altamente preciso que quede fuera de servicio frecuentemente ni servirá un sistema que esté siempre en funcionamiento pero cuya posición no sea precisa.

La fiabilidad del sistema dependerá de numerosos factores, entre los que destacan un diseño de calidad, materiales adecuados y un correcto mantenimiento, pero una vez cumplidas dichas características, la fiabilidad de un sistema de navegación inercial no debe afectar a su funcionamiento. Sin embargo, la precisión, o más bien, la variación de la precisión con el tiempo, es un factor primordial en la utilización de estos sistemas y en su combinación con otros sistemas de posicionamiento.

Debe diferenciarse en los sistemas de navegación inercial entre precisión a corto plazo y precisión a largo plazo. Básicamente, la precisión a corto plazo dependerá de la precisión de los acelerómetros, mientras que la precisión a largo plazo dependerá de los giróscopos. De una manera más amplia, la precisión a corto plazo vendrá dada por un

conjunto de variables entre las que se encuentran la correcta calibración del sistema y un buen estado general del mismo, además de por la calidad de los acelerómetros. Por otro lado, la precisión a largo plazo vendrá dada por la calidad de los giróscopos, pero se verá siempre mermada con el tiempo debido al desvío continuo que produce el algoritmo de integración de las aceleraciones y rotaciones.

Este proceso de integración introduce un fallo en los resultados que crece exponencialmente durante el periodo en el cual el sistema se encuentra en funcionamiento. La importancia de este desvío dependerá principalmente de la calidad y precisión de la calibración de los giróscopos, pero nunca se verá anulada. Una buena calidad en los giróscopos hará crecer a menor velocidad este error, pudiendo conseguirse errores de 1 o 2 metros en un periodo de funcionamiento de 5 minutos. Sin embargo, con giróscopos de baja calidad y mala calibración, en el mismo periodo de tiempo podemos acumular un error de hasta 25 metros, que haría inutilizable la posición para las aplicaciones de posicionamiento dinámico.

Este error, como hemos dicho, es función del tiempo, es decir, el error crece mediante se aleja el momento en el cual se le suministró al sistema una posición inicial. Por ejemplo, y siguiendo con los dos ejemplos anteriores, si al primer sistema se le suministra una posición en un momento determinado, este tomará esta posición como la de referencia a la que aplicarle los movimientos calculados mediante las mediciones inerciales. Esto irá dando como resultado la posición del buque cuyo error irá aumentando con el tiempo. En este caso, en los primeros 2 minutos podremos encontrar errores inferiores al metro, pero aumentando hasta los 2 o 3 metros a los 7 u 8 minutos. Si en ese momento se le suministra al sistema una nueva posición actualizada, el sistema desechará su última posición calculada y volverá a tomar la posición suministrada como referencia, volviendo el error a cero.

Esto hace que sea necesario un suministro periódico y continuo de posiciones actualizadas al sistema de manera que este nunca trabaje sobre una misma posición durante periodos largos de tiempo que harían que el error creciera inaceptablemente. Y es por ello que los sistemas de navegación inercial deben contar con otro sistema de posicionamiento que les suministre dichas posiciones. El tratado de estas combinaciones

de sistemas es la idea fundamental del trabajo y más concretamente de su último capítulo.

Capítulo III: Combinación de sistemas de navegación inercial con otros sistemas de posicionamiento

1 Introducción

Como ya se introdujo en el último apartado del capítulo anterior, los sistemas de navegación inercial precisan de otro u otros sistemas con los que combinarse y que puedan suministrarle periódicamente posiciones actualizadas que hagan reiniciarse el crecimiento exponencial del error intrínseco al proceso de cálculo. Esto hace necesario el estudio de la compatibilidad de los sistemas de navegación inercial con otro tipo de sistemas de posicionamiento. En este capítulo se tratará de manera general esta combinación para centrarse posteriormente en las dos opciones que se consideran más favorables y que se encuentran en uso en los sistemas actuales de posicionamiento dinámico, que son la combinación de sistemas GPS-DGPS con sistemas de navegación inercial y los denominados HAINS, siglas de *Hidro-acoustic Aided Inertial Navigation System*, o sistemas inerciales asistidos por sistemas hidro-acústicos.

2 Ventajas de la combinación de los sistemas inerciales con distintos sistemas PRS

Existen numerosos beneficios en usar sistemas inerciales como fuente de posición de un sistema DP. Estos beneficios se verán potenciados en función de las actividades llevadas a cabo por el buque y de la calidad de los equipos y de su complementación. Las principales ventajas que aporta esta combinación están relacionadas por un lado con una mejora de la calidad de las mediciones de los sistemas a los que se les acopla el sistema inercial y por otro lado por un aumento de la seguridad de las operaciones al contar con un sistema independiente de posicionamiento que puede actuar como PRS principal durante varios minutos.

2.1 Mejora de las mediciones de otros PRS mediante la combinación con sistemas inerciales

Esta mejora consiste en el filtrado de las medidas de un sistema PRS por parte de un sistema inercial. Acoplando, por ejemplo, un sistema inercial con un sistema hidro-acústico de posicionamiento, el sistema inercial ayudará a reducir el ruido de las mediciones y, por decirlo de alguna manera, rellenará los espacios en los que el sistema hidro-acústico no suministra posicionamiento.

Esta mejora es aplicable a cualquier sistema de posicionamiento. La gran precisión de los sistemas inerciales en periodos cortos de funcionamiento hace que la combinación de sus mediciones con las de cualquier otro sistema mejore las medidas de este último.

La mejora de los resultados deberá considerarse desde dos puntos. El primero de ellos es el de su precisión. Al contar con dos sistemas independientes calculando posiciones simultáneamente, estos se corrigen mutuamente aumentando la precisión de las mismas. Por otro lado, el hecho de que la posición final sea una suma de dos señales provenientes de diferentes equipos elimina parte del ruido y da a la señal de salida del equipo una mayor continuidad, sin saltos de posición.

Estos dos beneficios, tanto la mejora de la precisión como la mayor continuidad de las mediciones son factores importantes en el funcionamiento un sistema de posicionamiento dinámico. Debe tenerse en cuenta que estas medidas de posición son los datos sobre los que el sistema de control basará sus cálculos y por lo tanto sobre los que se exigirá la fuerza requerida a cada propulsor. Una mayor continuidad, sin saltos de posición, exigirá menos trabajo por parte de los propulsores, con el consiguiente ahorro de combustible.

2.2 Mejora de la seguridad al utilizar sistemas inerciales como fuente de un sistema DP

Como ya dijimos, otro beneficio a tener en cuenta a la hora de plantearse el instalar un sistema de navegación inercial como fuente de posición de un sistema DP es su carácter independiente. La mayoría de los sistemas actuales de posicionamiento precisan de medios externos al buque para su funcionamiento. El ejemplo más claro de ello son los

sistemas satelitarios de posicionamiento, los cuales basan sus cálculos en señales provenientes de satélites que se encuentran a miles de kilómetros del operador, y cuyo mantenimiento o arreglo en caso de fallo queda fuera del alcance de la tripulación del buque. Un fallo en el segmento externo al buque de estos sistemas deja al buque sin posicionamiento y sin acción posible a la hora de intentar superar el problema, puesto que el error no se encuentra a bordo. Otros sistemas a los que también es aplicable lo anterior es a los sistemas hidro-acústicos, que dependen de elementos exteriores al buque que en ocasiones se encuentran a miles de metros bajo la quilla.

Los sistemas de navegación inercial, sin embargo, ya se ha explicado que son completamente independientes, puesto que todo lo necesario para el cálculo de la posición se encuentra a bordo, con el aumento de la seguridad que ello supone. Esta cualidad de los sistemas inerciales es sumamente ventajosa a la hora de afrontar situaciones de emergencia o crisis. Momentos en los que, por cualquier motivo, los sistemas externos al buque fallaran, el sistema inercial puede suministrar posiciones precisas durante periodos de unos pocos minutos, minutos que, aunque puedan no ser suficientes para que los demás sistemas de posicionamiento vuelvan a funcionar, si pueden resultar claves a la hora de abortar los trabajos que se estén realizando y poder llevar al buque y a su tripulación a una situación segura.

Además, en los buques de posicionamiento dinámico, la instalación de un sistema de navegación inercial como soporte a otros sistemas supondrá una redundancia extra, pudiendo actuar el sistema inercial como sistema de posicionamiento en el caso de que alguno de los PRS principales fallara, sin quedar el buque fuera de Clase. Un ejemplo claro de una situación en la que se obtenga de los sistemas inerciales un aumento de la seguridad puede ser el de un buque DP Clase 3 con 3 PRS independientes más un sistema de navegación inercial como apoyo realizando una tarea cuyo *Time to terminate*, que recordamos que era el tiempo necesario para llevar al buque a una situación segura después de abortar una misión, sea de 10 minutos. En el improbable caso de que todos los PRS principales fallaran simultáneamente, el sistema de navegación inercial podrá suministrar una posición de alta precisión durante el tiempo necesario para llevar al buque a una posición segura, salvando así la situación.

3 Combinaciones de sistemas inerciales con otros sistemas de posicionamiento a bordo de buques de posicionamiento dinámico

Como se ha dicho, los sistemas inerciales son un buen complemento para cualquier sistema de posicionamiento que podamos encontrar a bordo, así como un elemento extra de seguridad para el buque. Pero existen sistemas de posicionamiento concretos a los cuales la combinación con sistemas inerciales les favorece especialmente. Es el caso del sistema GPS y sus subsistemas DGPS y DARP-GPS y de los sistemas hidro-acústicos. Estas combinaciones serán utilizadas en tareas en las cuales la precisión requerida sea alta, como aquellas desempeñadas por buques de posicionamiento dinámico.

3.1 Sistemas integrados INS/GPS

Los sistemas integrados INS/GPS, *Inertial Navigation System/Global Positioning System* son aquellos sistemas formados por la combinación de un sistema inercial y un receptor GPS.

Tanto los sistemas GPS como los sistemas inerciales tienen una serie de características que hacen que su combinación resulte sumamente ventajosa. Como ya se ha explicado, los sistemas inerciales son sistemas autónomos e independientes, que no necesitan referencias del exterior para calcular la posición, por lo que cualquier elemento del sistema está al alcance de la tripulación para su reparación en caso de fallo. Además, son sistemas con una gran precisión en periodos cortos de tiempo pero cuya precisión se degrada exponencialmente a lo largo de un periodo de funcionamiento debido al error introducido por el proceso de integración.

El sistema GPS, como se explicó en el capítulo dedicado a los sistemas de posicionamiento dinámico, es un sistema satelitario de posicionamiento que ofrece el cálculo de la posición con un error en el orden del metro si se utilizan en sistemas diferenciales, cuya precisión se mantiene prácticamente constante en el tiempo, sin sufrir variaciones importantes. Por otro lado tenemos que es un sistema completamente dependiente del exterior, puesto que el único dispositivo que se encuentra a bordo es el receptor GPS que precisa para su funcionamiento de los satélites, del segmento de

control, y de las estaciones terrestres en el caso de que se utilice un sistema diferencial, elementos que se encuentran fuera del alcance de la tripulación del buque, quedando esta sin actuación posible en caso de fallo en estos elementos exteriores.

Centrándonos en las características opuestas de ambos sistemas, su integración deja atrás las desventajas individuales y proporciona una navegación más segura y precisa de la que ofrecen ambos sistemas de manera independiente. [3] ⁴La navegación obtenida mediante la integración de ambos sistemas ofrece tanto posición como velocidad y altitud con una precisión mejorada tanto en periodos largos como en periodos cortos de tiempo. El sistema GPS evita el aumento exponencial del error sufrido por los sistemas inerciales mientras que el sistema inercial ofrece posiciones de gran precisión y actúa como fuente principal de posicionamiento en los momentos en los que el GPS no esté disponible.

Cabe destacar una serie de puntos sobre los cuales se basan las ventajas de la combinación de estos sistemas:

- ✓ Precisión: Como ya sabemos, debido al proceso de integración necesario para el cálculo de la posición en un sistema inercial, estos sistemas pueden experimentar un crecimiento exponencial del error en sus resultados, aun con sensores altamente precisos. Por lo tanto, surge la necesidad de suplir al sistema con una fuente que, periódicamente, corrija esos errores. Un receptor GPS cumple esta cualidad, por lo que su asociación da como resultado un control del crecimiento del error en el sistema inercial.
- ✓ Velocidad de datos: La señal de salida de un receptor GPS es, normalmente, de 1 Hz en los equipos comunes y de 10 Hz en los equipos más sofisticados. Este suministro de datos no es suficiente para el manejo del buque a través de pilotos automáticos. La velocidad de datos suministrada por el sistema inercial de navegación es mucho mayor, tan alta como pueda computar el procesador del sistema. La combinación de ambos sistemas ofrece como resultado un sistema capaz de suministrar una velocidad de datos suficiente para las aplicaciones necesarias.

⁴ Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their integration, pág. 247.

- ✓ Disponibilidad: Como ya hemos dicho, el sistema GPS es un sistema dependiente del exterior que depende de las señales emitidas por el segmento de satélites. Es por esto que el receptor GPS puede verse afectado por cortes en las señales e interferencias. Por el contrario, el sistema inercial es independiente y prácticamente inmune a influencias exteriores. Por lo tanto, la combinación de ambos sistemas ofrece una solución continua de la navegación, aun en periodos en los que el sistema GPS se vea afectado por algún error.

3.1.1 *Filtrado Kalman*

En el estudio de los sistemas combinados INS-GPS toma especial importancia los filtros Kalman. Pese a que su estudio queda fuera del tema del trabajo, se tratará de dar una explicación breve sobre las bases del filtrado Kalman con el objetivo de poder comprender mejor la interacción de los sistemas INS con los sistemas GPS.

En general, un filtro Kalman es un algoritmo utilizado para estimar los errores de un sistema mediante mediciones contaminadas por ruido. Consiste en un algoritmo secuencial que proporciona una estimación optimizada de las variaciones sufridas por los errores de un sistema. Para ello utiliza todas las mediciones disponibles, sin tener en cuenta su precisión, para, dándole a cada una el peso correspondiente, interpretar las tendencias que siguen las mediciones del sistema. [3]⁵La información requerida por el filtro Kalman se resume en estos tres puntos:

- ✓ Información sobre el modelado del sistema y sus mediciones.
- ✓ Información estadística sobre el ruido del sistema y los errores en las mediciones.
- ✓ Información sobre las condiciones iniciales de funcionamiento.

En los sistemas inerciales, el filtrado Kalman se utiliza para la medición secuencial y periódica de una misma señal con diferentes características de ruido. Estos diferentes ruidos son combinados con el objetivo de obtener una tendencia en el comportamiento del mismo y poder contrarrestarlo en futuras mediciones, obteniendo una señal más clara y precisa.

En los sistemas INS-GPS son utilizados dos tipos de filtros Kalman dependiendo de qué

⁵ Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration, pág. 225.

tipo de combinación se aplique. Estos dos tipos son los denominados LKF (Linearized Kalman Filtering) y EKF (Extended Kalman Filtering).

3.1.1.1 Linearized Kalman Filtering

Cuando un filtrado Kalman se aplica a sistemas que han sido linearizados basándose en una trayectoria nominal, previamente conocida, como puede ser la trayectoria de un buque, se los conoce como LKF. Es el filtro usado en las combinaciones INS-GPS de lazo abierto, en las cuales la señal suministrada por el sistema inercial se considera como la trayectoria nominal.

3.1.1.2 Extended Kalman Filtering

A veces la trayectoria nominal no puede ser previamente conocida. Cuando esto sucede, la trayectoria es estimada continuamente a través de las mediciones pasadas más recientes. Cuando se aplica un filtrado Kalman a sistemas que utilizan esta estimación, se les denomina EKF, y es el utilizado en los sistemas INS-GPS de lazo cerrado.

3.1.2 Arquitecturas de un sistema INS-GPS

Existen dos arquitecturas posibles en un sistema integrado INS-GPS, diferenciadas por la retroalimentación de los errores estimados y sus correcciones correspondientes. Cada una de estas arquitecturas cuenta con un filtrado Kalman de los explicados en el apartado anterior.

3.1.2.1 Arquitectura de lazo abierto

Los sistemas INS-GPS de lazo cerrado son aquellos en los que las correcciones y estimaciones de errores sobre las mediciones de velocidad, posición y altitud son realizadas de manera externa al sistema de navegación inercial. [3]⁶. Estos errores estimados o sus correcciones, calculadas a partir de la señal de salida del sistema inercial no son reenviados al mismo para que este aplique las correcciones.

Como vemos en la imagen 32, la señal del GPS y del INS se combinan en el Filtro Kalman, donde ambas señales son comparadas y combinadas, y donde se les aplica el

⁶ Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration, pág 249.

filtrado Kalman LFK. A esta señal resultante se le aplican las correcciones necesarias calculadas por el filtro Kalman, obteniendo los datos de navegación.

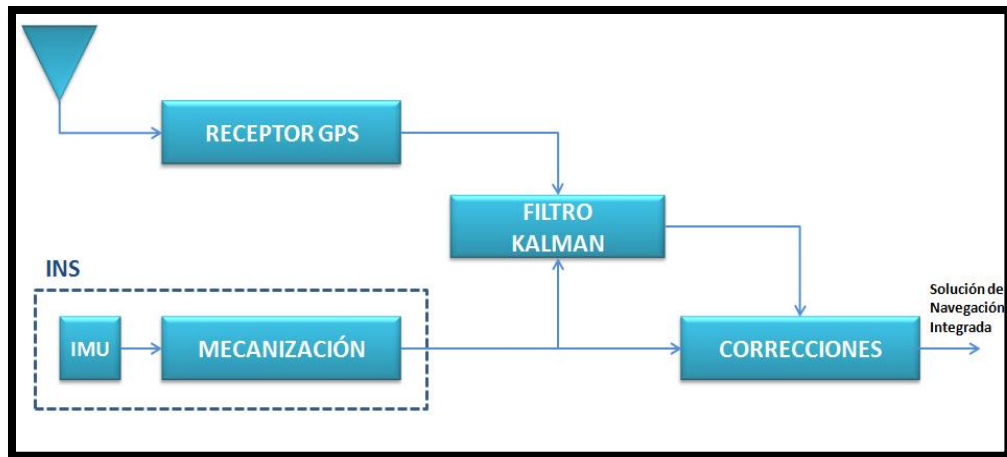


Imagen 32: Diagrama de bloques de un sistema de lazo abierto.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2 Arquitectura de lazo cerrado

En estos sistemas, la integración se produce en el sistema inercial. Las señales de salida obtenidas por ambos sistemas son combinados en el Filtro Kalman, donde se obtienen a través del filtrado Kalman EFK las correcciones necesarias para compensar los errores. El sistema INS es alimentado con dichas correcciones, que incluyen correcciones a los errores estimados tanto de los giróscopos como de los acelerómetros. Una vez el sistema ha recibido y aplicado dichas correcciones, la salida del sistema INS ofrece ya los datos de navegación.

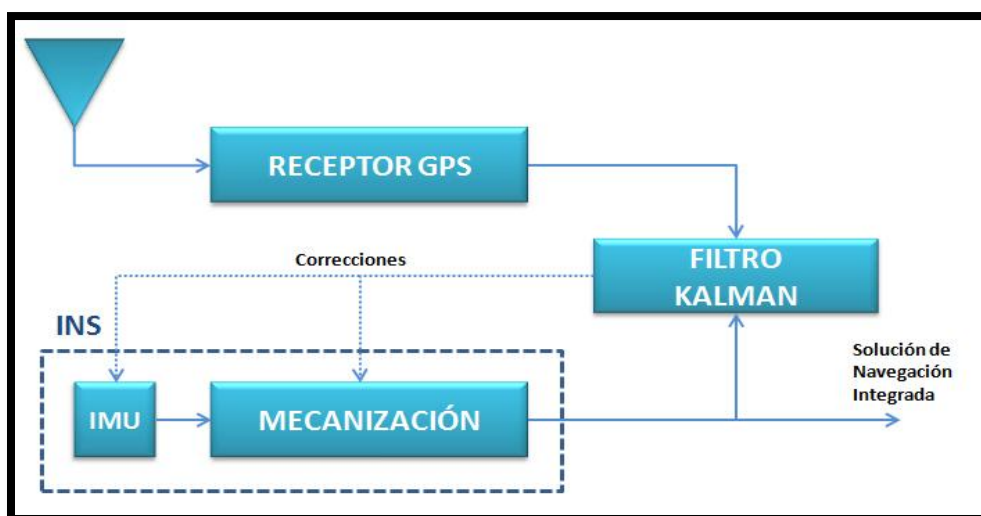


Imagen 33: Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen puede verse el diagrama de bloques típico de un sistema INS-GPS de lazo cerrado. Puede verse como se trata de un circuito cerrado en el cual el filtro es alimentado por la señal GPS y por la señal del sistema INS al que a su vez se le aplican las correcciones calculadas por el filtro Kalman. Puede observarse también como una vez el sistema INS es corregido a través de la señal proveniente del filtro, su señal de salida ofrece ya los datos de navegación deseados.

3.1.3 Niveles de integración en los sistemas INS/GPS

Existen en el diseño de los sistemas INS/GPS dos niveles de integración conocidos como *loosely coupled systems* y *tightly coupled systems*. Estas configuraciones diferencian el nivel de acoplamiento entre ambos sistemas.

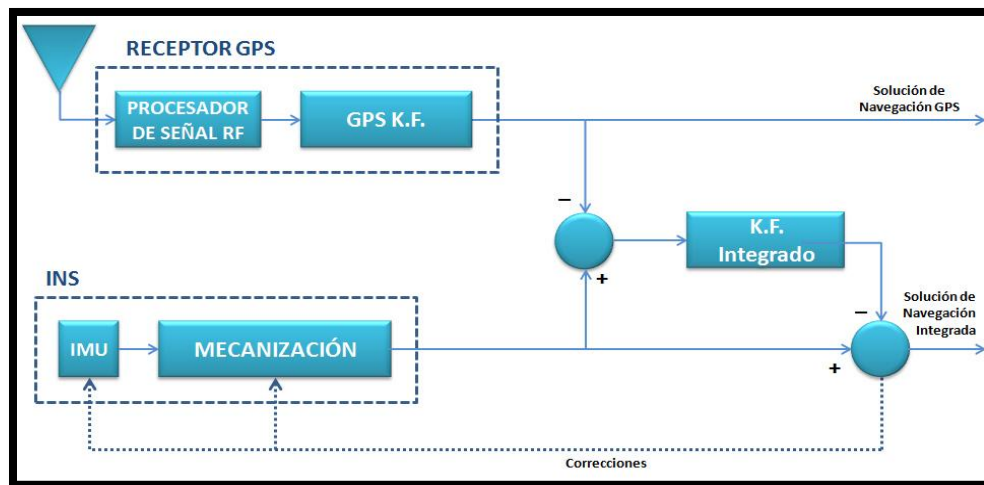


Imagen 34: Diagrama de bloques de un sistema Loosely Coupled

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.1 Loosely coupled systems

Este nivel de integración es el más bajo. En estos sistemas las soluciones ofrecidas por el GPS y por el sistema inercial son combinadas en un filtro Kalman, cuya salida es la solución final de la navegación. Además, cada sistema (INS y GPS) puede contar con su propio filtro Kalman [11]⁷. Estos sistemas en realidad no ofrecen una mejora de las prestaciones de cada subsistema combinado, pues el sistema inercial y el GPS no comparten información y por lo tanto no se corrigen mutuamente. Es decir, la integración a este nivel no modifica el funcionamiento que cada sistema tendría de manera individual, sino que únicamente utiliza las salidas de ambos sistemas para

⁷ Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation and Integration, pág. 476.

ofrecer una solución a la navegación mejorada. Las implementaciones de estos sistemas pueden realizarse mediante la conexión de un receptor GPS común y un sistema de navegación inercial.

3.1.3.2 Tightly coupled systems

Este segundo nivel de integración supone ya cambios en el funcionamiento de cada sistema individual y ofrece un mejor funcionamiento y una mayor precisión. En estos sistemas, los filtros Kalman del receptor GPS y el del sistema de navegación inercial son combinados en uno solo. Las diferencias entre los *pseudo-ranges* medidos por el GPS y los correspondientes valores predichos por el sistema de navegación inercial son suministrados al filtro Kalman, el cual los compara y calcula correcciones que son aplicadas al sistema de navegación inercial, que ofrece la solución a la navegación mejorada.

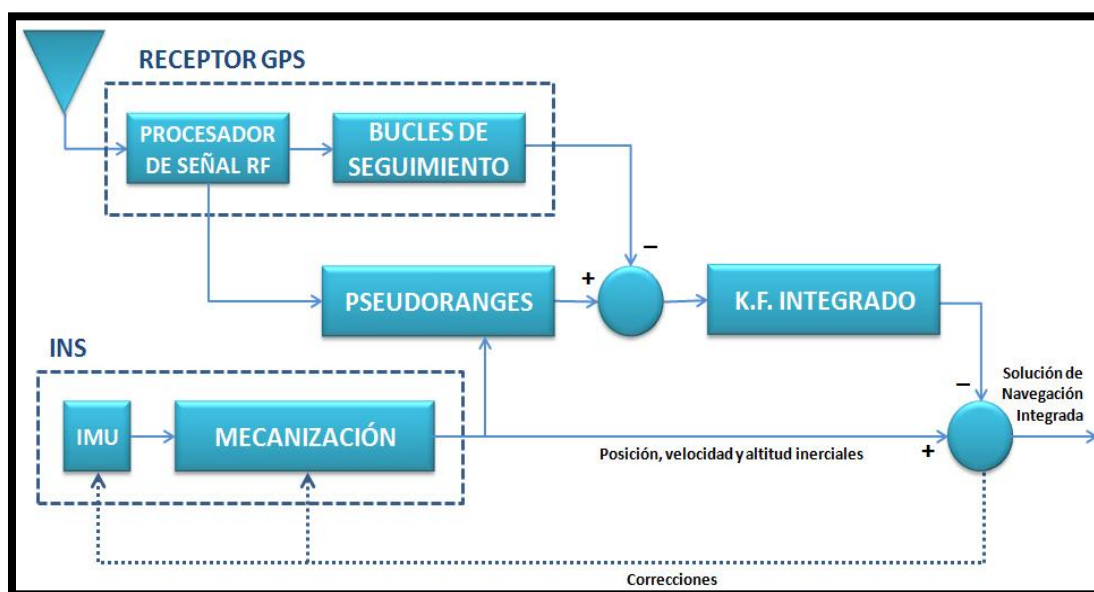


Imagen 35: Diagrama de bloques de un sistema Tightly Coupled.

Fuente: Elaboración propia.

Existe dentro de este nivel de integración un subnivel que algunos autores consideran como nivel independiente, definido como *ultra-tightly coupled systems*, en la cual el sistema de navegación inercial pasa a ser parte física del receptor GPS, el cual cambia su configuración para incluir los datos obtenidos por el sistema inercial en el cálculo de

la posición. En este tipo de integración los sistemas inerciales y GPS dejan de ser navegadores independientes, pasando a formar parte de un único sistema.

3.1.4 Resultados de la aplicación de los sistemas integrados INS/GPS

Como muestra de la eficacia que ofrece la combinación de ambos sistemas en general y en concreto en los buques de posicionamiento dinámico, creo importante aportar datos reales sobre la eficacia de esta integración. Puesto que la prueba en un buque con equipos reales queda fuera de nuestras posibilidades, se utilizarán los datos obtenidos y presentados por el *Dynamic Positioning Committee* en su reunión la *DP Conference* de 2008 en Houston. Según lo tratado en esta conferencia, las ventajas principales obtenidas de la combinación de los sistemas son varias, y aunque ya se ha hablado de alguna de ellas, se volverán a tratar aportando los datos reales ofrecidos en esta conferencia.

3.1.4.1 Detección y corrección de saltos en la posición GPS

Uno de los errores más comunes en los receptores GPS es el denominado *Jump* o salto. Este error puede ser producido por varios motivos, ya sea el cambio de la constelación visible de satélites, o la interrupción momentánea de la línea de visión por ejemplo al pasar por debajo de un puente. Esto produce un salto en la posición, que en ocasiones puede suponer diferencias de varios metros en la posición ofrecida por el receptor. En una navegación cotidiana, un error de 4 o 5 metros no es significativo, pero en una maniobra de aproximación a una plataforma, típicamente realizada por los buques DP, saltos de hasta 0,5 o 1 metros pueden afectar de manera importante la seguridad de la operación. Es por esto que el *DP Committee* propone y estudia la utilización de los sistemas inerciales como medio para paliar el efecto de estos saltos, obteniendo un buen resultado en la combinación de estos sistemas. La explicación a estos buenos resultados puede entenderse a partir de las ventajas expuestas en los apartados anteriores del trabajo, en donde se explica la continuidad que el sistema inercial aporta a la señal GPS, evitando los saltos y los cambios bruscos de posición

3.1.4.2 Demanda de propulsión

En los buques de posicionamiento dinámico, como se explicó en la primera parte del

trabajo, se trabaja con propulsión constante y activa, es decir, el buque mantiene su posición por medios activos, mediante sus propios propulsores, adecuando la fuerza y dirección de los mismos de tal manera que el buque mantenga la posición o se desplace de la manera deseada. Las órdenes a los propulsores son dadas por el ordenador DP y calculadas a partir de las correcciones a la posición obtenidas de comparar la posición deseada de la posición real calculada por los PRSs que se encuentren a bordo. Como ya se explicó en el apartado de “Mejora de las mediciones de otros PRS mediante la combinación con sistemas inerciales” la combinación de los sistemas inerciales con otros PRSs y en concreto con el GPS da continuidad a la señal de salida de este último sistema, evitando saltos en la posición. Como puede suponerse, los saltos y discontinuidades en la posición ofrecida al ordenador encargado de calcular la potencia requerida por parte de los propulsores harán que el nivel de optimización de las órdenes de propulsión sea menor y que por lo tanto estas deban ser más frecuentes y bruscas. Los resultados de la combinación de los sistemas inerciales con los sistemas GPS arroja como resultado una sorprendente disminución de la demanda de propulsión por parte del buque en comparación con la misma situación pero trabajando solo con un sistema GPS. Los resultados pueden se muestran en la gráfica de la imagen 36, en la que puede verse la demanda de propulsión tanto en dirección proa-popa como babor-estribor comparando un sistema combinado de INS+DGPS con un sistema que trabaja únicamente con un receptor DGPS.

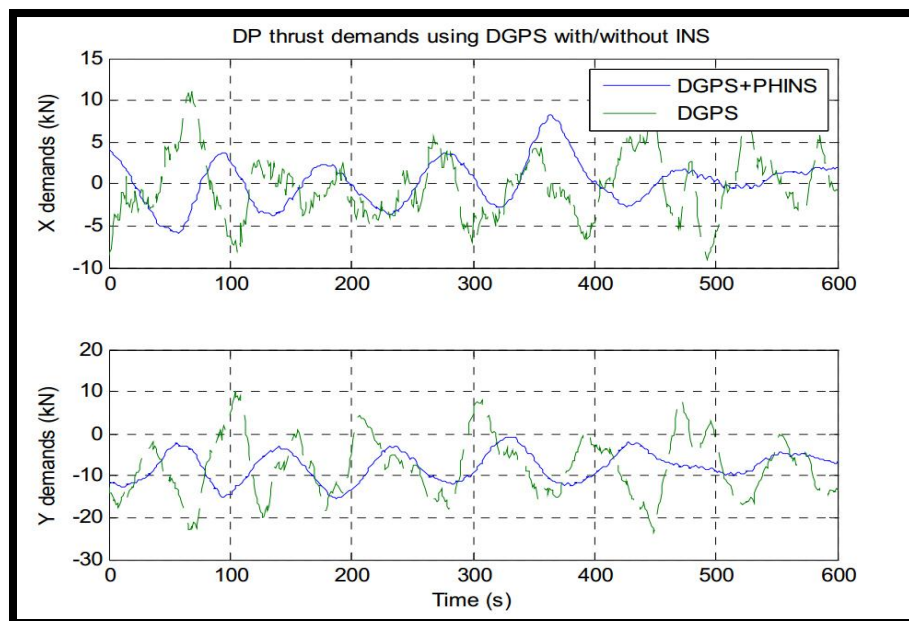


Imagen 36: Demanda de propulsión en un sistema DGPS y en un sistema DGPS+INS

Fuente: [14] pág. 9.

Estas gráficas son el resultado de una prueba realizada en un buque de 7000 toneladas montado un equipo de posicionamiento dinámico Converteam utilizando como PRS un sistema DGPS y un sistema de navegación inercial. Puede observarse como no solo la cantidad total de propulsión requerida es menor, sino que las órdenes dadas a los propulsores son más suaves y menos cambiantes, con el consiguiente ahorro de combustible que se tratará en el apartado siguiente y el trabajo más suave de los propulsores, que se ven menos afectados por averías.

3.1.4.3 Consumo de combustible

Como resultado de lo explicado en el apartado anterior es obvio que la combinación del sistema DGPS y el INS ofrece un ahorro importante de combustible. Una menor exigencia de propulsión y unas órdenes más suaves y continuadas hacen que el ahorro de combustible sea considerable. Utilizando los datos de la demanda propulsora se realiza una estimación del gasto de combustible ocasionado por ambos sistemas. El resultado se muestra a continuación en la imagen 37, donde puede verse que el buque utilizando el sistema combinado INS+DGPS consume hasta un 30% menos de combustible que cuando usa únicamente el sistema DGPS.

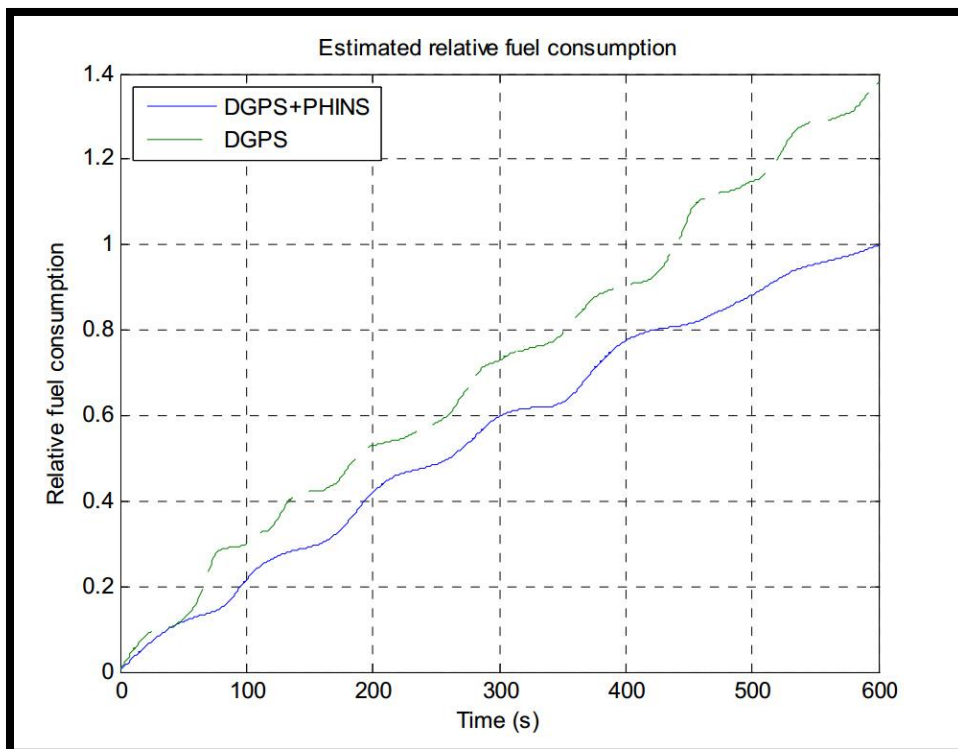


Imagen 37: Estimación del consumo de combustible en las situaciones expuestas en la imagen 36.

Fuente: [14] pág. 9.

3.1.4.4 - Posicionamiento en momentos en los que el GPS no se encuentre en servicio

Otro de los aspectos destacados por el *DP Committee* en cuanto a las ventajas de la integración de los sistemas GPS con la navegación inercial es la capacidad de esta última para sustituir al GPS como PRS principal cuando este se encuentre fuera de servicio por cualquier motivo. Pueden darse casos en los que, por encontrarnos en zonas de latitudes altas o por estar el buque DP trabajando cerca de grandes estructuras tales como puentes, molinos de viento o plataforma que obstruyan la visión de la antena GPS de parte del cielo, la constelación visible de satélites sea solo de 3 o 4 aparatos, trabajando el receptor con los satélites mínimos que permiten el posicionamiento. En estas situaciones no sería extraño que, puesto que los satélites se encuentran orbitando, se produzcan cambios en la constelación visible, de manera que, durante periodos cortos de tiempo, el receptor reciba la señal únicamente de 1 o 2 satélites. En los periodos de tiempo que tarda la constelación visible en volver a contar con un número suficiente de satélites, los sistemas inerciales son capaces de aportar la posición con una precisión aceptable.

La evolución del error debido al proceso de integración de los valores de aceleración marcará el tiempo durante el cual la posición aportada por el sistema inercial sigue siendo válida. Existen numerosas variables que pueden afectar al crecimiento de este error, alguna de las cuales ya han sido explicadas anteriormente, tales como la precisión de los acelerómetros. La prueba realizada por el *DP Committee* consistió en retirarle al sistema de navegación inercial las actualizaciones periódicas aportadas por el GPS, simulando un corte en el servicio, y se compararon las posiciones calculadas por ambos sistemas de manera independiente. Esta prueba fue realizada varias veces, obteniéndose gran variedad de resultados. Los gráficos de la imagen 39 recogen la frecuencia con la que aparecieron los distintos errores.

Puede observarse que para cortes en el servicio GPS de 2 minutos, el error típico fue de 2 metros, encontrando errores mínimos de 0.5 metros y máximos de 4,5. Por otro lado, en cortes de servicio de 5 minutos, el error típico fue de 6 metros, mientras que el máximo fue de 22. Como ya se ha dicho, para buques DP realizando maniobras críticas

como tendido de cables submarinos o aproximaciones a plataformas, errores de 20 metros pueden ser catastróficos.

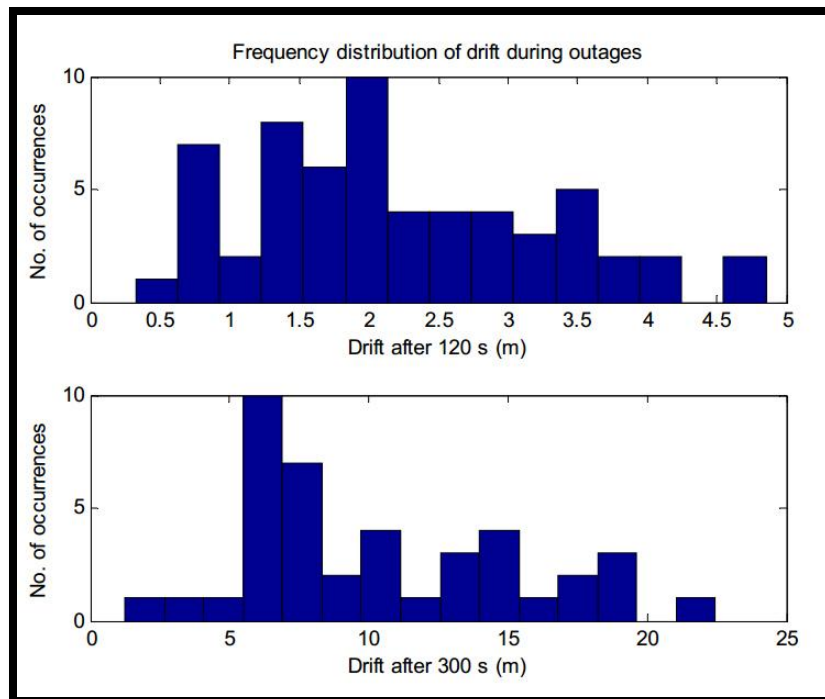


Imagen 38: Frecuencia de la aparición de distintos errores en el sistema INS trabajando de manera independiente

Fuente: [14] pág. 11.

Pero no debe considerarse estos errores como los que podrían aparecer en una situación normal. Deben entenderse como los que se tendría en situaciones críticas en las que probablemente de no contar con el sistema inercial, los errores serían mucho mayores. Es por esto que esta ventaja de la integración INS/GPS debe considerarse como un pequeño plus de seguridad aportado por el sistema inercial en situaciones críticas.

3.1.5 Conclusiones sobre los sistemas INS/GPS

En el negocio marítimo hay dos objetivos que podrían considerarse como los más importantes, ya se hable de buques convencionales o, como en este caso, de buques equipados con equipos de posicionamiento dinámico. Estos objetivos son la seguridad por un lado, y el mínimo coste de explotación posible por otro, objetivos que, muchas veces, son contrapuestos. Pero como se ha visto en los datos mostrados en este apartado, la navegación inercial da la oportunidad de convertir un receptor GPS en un equipo que aporte precisamente más seguridad y un menor gasto de combustible. Es por ello que en

la actualidad, y desde hace pocos años, esta tecnología se abre camino en el mundo Off-shore, en el cual las maniobras DP se encuentran a la orden del día, y en el que la seguridad es algo fundamental, más incluso que en otros ámbitos del negocio marítimo. Y es de esperar que las ventajas que ofrece la combinación de estos dos sistemas se apliquen cada día a más campos de la navegación, puesto que como se ha visto, da como resultado un equipo más robusto, con mayor precisión, mayor seguridad y mayor frecuencia de salida de datos, lo que lo hace un equipo a tener en cuenta en el manejo de buques y embarcaciones a través de pilotos automáticos, los cuales parecen estar destinados a tomar cada vez más el control de los buques mercantes.

3.2 HAINS, Hydroacoustic Aided Inertial Navigation System

En este apartado del trabajo se tratará la combinación de equipos de posicionamiento acústicos con sistemas de posicionamiento inercial. Para ello se utilizarán los datos y conclusiones obtenidas por el *DP Committee* en su estudio sobre estos sistemas en la *Dynamic Positioning Conference* de 2007.

3.2.1 Introducción a los sistemas acústicos a bordo de buques con posicionamiento dinámico

Como ya fue explicado en el primer capítulo del trabajo, los sistemas de posicionamiento acústicos o HPR (Hydroacoustic Positioning Reference) son equipos comúnmente encontrados a bordo de los buques de posicionamiento dinámico como fuente de posición del ordenador DP. Pese a la gran variedad de sistemas acústicos existentes, en los buques de posicionamiento dinámico son utilizados principalmente dos tipos de sistema, a saber, los *Super Short base line* o *Ultra Short Base line*, denominados normalmente como SSBL o USBL, y los *Long Base Line* o LBL. Pese a que ambos sistemas fueron explicados de manera general en el apartado de “Sensores y sistemas de posicionamiento PRS” en el primer capítulo del trabajo, cabe recordar las características principales de cada uno de estos sistemas.

- ✓ SSBL: Basa su funcionamiento en la medición de la distancia y el ángulo que separan un transductor instalado en el fondo del buque y un transpondedor instalado en el fondo marino. La precisión suele rondar un 0,2 por ciento de la

distancia que separe al transductor del transpondedor, por lo que a una distancia de 1500 metros, el error medio será de 3 metros.

- ✓ LBL: Basa su funcionamiento en la medición de las distancias entre un único transductor situado en el fondo del buque y una serie de transpondedores situados de forma geométrica en el fondo del mar. Su precisión suele rondar el metro independientemente de la profundidad.

Los sistemas SSBL suelen ser utilizados con mayor frecuencia, debido a que la preparación del terreno es menor, puesto que solo es necesaria la colocación de un transpondedor, mientras que en los sistemas LBL deben colocarse varios.

En ambos sistemas, una característica importante es el intervalo entre medidas, o la frecuencia con la cual el sistema es capaz de calcular la posición. Debe tenerse en cuenta que su funcionamiento se basa en la emisión de señales desde el transductor hacia el transpondedor para que esta sea devuelta nuevamente hacia el transductor, el cual mide el tiempo de vuelo de la señal y calcula la distancia recorrida. Sabiendo que la velocidad del sonido en el agua es aproximadamente de 1500 metros por segundo, esto supone que, por cada 1500 metros de profundidad, la señal tardará 2 segundos en realizar el recorrido necesario, y por lo tanto el sistema tardará ese mismo tiempo en dar la siguiente posición. Esta baja frecuencia de cálculo de posiciones es una desventaja a la hora de combinar dichas medidas con las de otros equipos en el ordenador DP. Como ya se explico, el sistema de control DP encargado de realizar los cálculos de posicionamiento y al cual le son suministradas todas las señales de salida de los PRS que se encuentren a bordo, asigna un nivel de importancia a cada PRS en función de la continuidad y estabilidad de la posición calculada. Esto hace que, por lo general, debido a que los periodos entre las posiciones calculadas por sistemas HPR varían entre 1 y 6 segundos, el sistema de cálculo de la posición del equipo DP dé más importancia a las señales provenientes de equipos como el GPS. Esta desventaja será una de las que, como veremos a continuación, desaparecen al combinar los sistemas HPR con sistemas inerciales de navegación.

3.2.2 Aspectos positivos de la combinación de los sistemas acústicos de posicionamiento con sistemas inerciales de navegación

De manera similar a lo que ocurriría con la combinación de los sistemas inerciales con el sistema GPS, la integración de los equipos acústicos y los inerciales resulta tan positiva debido a las características complementarias de ambos sistemas.

Por un lado tenemos que, por lo general, los sistemas acústicos son sistemas con una precisión alta y constante a lo largo del tiempo que, sin embargo, tienen una baja frecuencia de salida de la señal, aportando las posiciones separadas por intervalos que pueden estar comprendidos entre uno y seis segundos dependiendo de la profundidad en la que se trabaje. Por otro lado tenemos que el sistema inercial, como ya hemos explicado, cuenta con una precisión alta pero afectada con el tiempo por el error exponencial, además de contar con una alta frecuencia de salida en la señal de la posición, ofreciendo datos sobre la misma de manera prácticamente continua. Por lo tanto, tras la integración de ambos sistemas obtendremos un equipo con una alta fiabilidad y precisión y con una frecuencia de salida de datos todo lo alta que se desee. Aplicando estos sistemas al ámbito de las embarcaciones equipadas con equipos de posicionamiento dinámico, las principales ventajas a tener en cuenta serán:

- ✓ Mejora de la precisión: La combinación de un sistema acústico con un dispositivo inercial de navegación mejora la precisión del primero, reduciendo el error en la posición a la mitad o a un tercio del error original. Esto es producido por la función correctora que ejerce el sistema inercial sobre el acústico y viceversa, basándose en estimadores tales como los filtros Kalman explicados anteriormente.
- ✓ Mayor velocidad de salida de datos: Como ya explicamos en el apartado de los sistemas INS/GPS, para el manejo automático de buques es importante la velocidad o frecuencia con la que se suministran datos de posición. El sistema inercial es capaz de suministrar un posicionamiento prácticamente continuo, con una velocidad de salida de datos tan alta como el computador del sistema pueda soportar. Sin embargo, en el sistema acústico, esta velocidad se ve bastante reducida. La combinación de ambos sistemas soluciona este problema, aumentando la velocidad de salida de datos del sistema en conjunto.
- ✓ Trabajos a mayor profundidad: Que la combinación de estos dos sistemas haga

posible trabajos a mayor profundidad depende principalmente de dos factores. El primero de ellos es el aumento de la precisión explicado anteriormente. Como se vio en la introducción a los equipos acústicos, la precisión de estos dependerá de la profundidad. Así mismo, vimos que un equipo SSBL trabajando a una profundidad de 1500 metros tendría un error de hasta 3 metros. Suponiendo que este error de 3 metros fuera el máximo error asumible, la combinación ofrecida en los sistemas HAINS, que como vimos reduce el error a la mitad o a un tercio, permitiría trabajos hasta a 4500 metros, el triple de la profundidad a la que el equipo acústico individualmente daría ya el error máximo. Por otro lado, sabemos que la frecuencia de salida de datos del equipo acústico dependerá de la profundidad a la que se esté trabajando, puesto que de ella dependerá el tiempo de vuelo del impulso sonoro. En el caso de que estuviéramos trabajando a 4500 metros de profundidad, el intervalo entre dos posiciones alcanzaría los 6 segundos, pudiendo ser este periodo demasiado largo para el control del buque mediante el sistema DP. Pero como hemos visto, en los sistemas HAINS, la velocidad de salida de datos se ve aumentada con respecto a los equipos acústicos, solucionando el problema independientemente de la profundidad a la que se trabaje.

- ✓ Mayor batería de los transpondedores: Cuando un sistema acústico trabaja de manera individual, se interroga a los transpondedores de manera constante dada la necesidad de actualizar la posición lo antes posible. Pero la combinación con los sistemas inerciales permite utilizar la posición obtenida por el sistema inercial en los periodos de tiempo existentes entre dos posiciones dadas por el sistema acústico. El contar con este posicionamiento continuo capaz de “rellenar” los huecos existentes entre dos posiciones obtenidas por medios acústicos hace posible alargar dichos periodos, aumentando el tiempo entre pulsos y por lo tanto disminuyendo en número de veces que se interroga a los transpondedores. Esto hace que estos dispositivos consuman menos energía y que por lo tanto sus baterías duren más tiempo.
- ✓ Mayor seguridad en el caso de una avería en el sistema acústico: Como vimos en los sistemas INS/GPS, el sistema inercial puede actuar como fuente de

posicionamiento durante periodos de unos pocos minutos en el caso de que el sistema acústico dejara de funcionar. Esto supone, como ya se explicó, un extra de seguridad ofrecido por el equipo en situaciones críticas en las que no se cuente con el sistema acústico.

3.2.3 Pruebas realizadas por el DP Committee a bordo de la plataforma oceánica “Eirik Raude”

Siguiendo con la misma filosofía con la que se explicó el sistema INS/GPS, para demostrar la eficiencia de los sistemas HAINs he considerado apropiado el incluir algunos datos obtenidos del estudio realizado a bordo de la plataforma Eirik Raude durante un periodo de tiempo de un mes, entre julio y agosto de 2007, mientras esta realizaba operaciones de perforación en el golfo de México a una profundidad de 2700 metros.

Las pruebas consistieron en almacenar y registrar durante un mes las posiciones obtenidas por el equipo HAINS por un lado, por el HiPAPS (High Precision Acoustic Positioning System) por otro y por último por el sistema inercial de manera independiente.

Comenzaremos analizando el registro de posiciones obtenido por parte del sistema inercial trabajando de manera independiente. En la siguiente gráfica podemos ver la

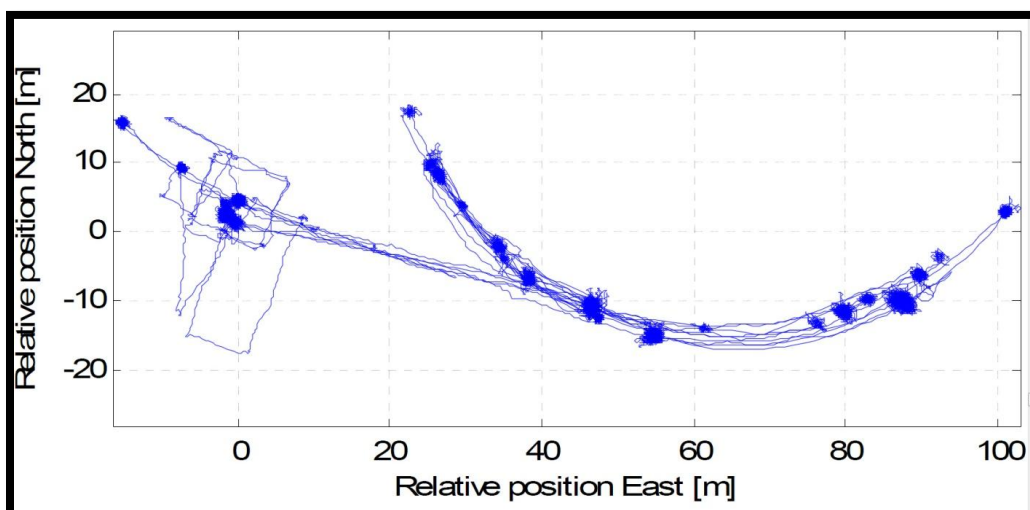


Imagen 39: Historial de posiciones del equipo HAINS.

Fuente: [13] pág. 10.

trayectoria del equipo a lo largo del mes que estuvo a bordo de la plataforma.

Puede observarse en el gráfico un primer movimiento (situado más al oeste) que no debe considerarse pues están involucrados movimientos del propio equipo inercial. Las mediciones interesantes para el tema que tratamos son las que forman un arco de circunferencia. Este arco se forma debido a la rotación de la plataforma, que pese a que se encuentra situada en una posición geográfica fija, experimenta movimientos de rotación sobre su eje vertical, y al encontrarse el dispositivo inercial a una distancia de entre 45 y 50 metros de ese eje, su registro de posiciones conforma el mencionado arco de circunferencia. Pero puede observarse la precisión de las medidas imaginando un teórico centro de la circunferencia y que las medidas se encuentran casi en su totalidad dentro de la trayectoria de dicha circunferencia, cuyo radio será la distancia que separa el equipo inercial del centro de rotación de la plataforma. El siguiente gráfico ilustra la comparación con la circunferencia.

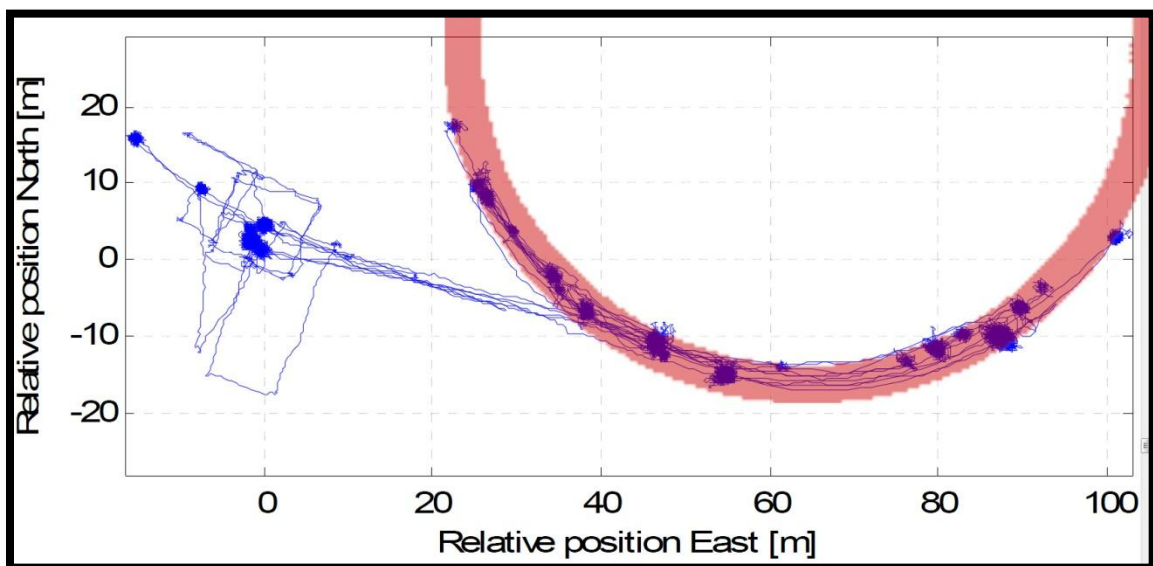


Imagen 39b: Histórico de posiciones del equipo HAINS en comparación con la circunferencia.

Fuente: [13] pág. 10.

Una vez mostrados los datos obtenidos por el equipo inercial y demostrada su precisión, se mostrarán los gráficos en los cuales se comparan las medidas obtenidas por el equipo HAINS con el equipo HiPAP, así como el error medio obtenido por el sistema HAINS en comparación con la posición aplicada por el sistema de posicionamiento dinámico.

En el siguiente gráfico, mostrado en la imagen 40, podemos observar el error registrado

por el sistema HAINs en comparación con la posición de referencia de la plataforma. Puede verse la alta precisión ofrecida por el sistema. Recordemos que un sistema acústico puede producir un error equivalente al 0.2 por ciento de la profundidad a la que se esté trabajando. Estas pruebas fueron realizadas mientras la plataforma trabajaba a una profundidad de 2700 metros por lo que el error, de haber usado un equipo acústico independiente, podría haber alcanzado los 5.5 metros. Por el contrario, observamos que al combinar dicho sistema dentro de un equipo HAINs, la posición obtenida tiene un error medio de 0,55 metros. Pueden observarse varios momentos en los que el error aumenta de manera importante, alcanzando los 2,5 metros. Esto es debido a problemas puntuales tales como un corte en el suministro de energía al equipo y un *reset* del equipo HAINs.

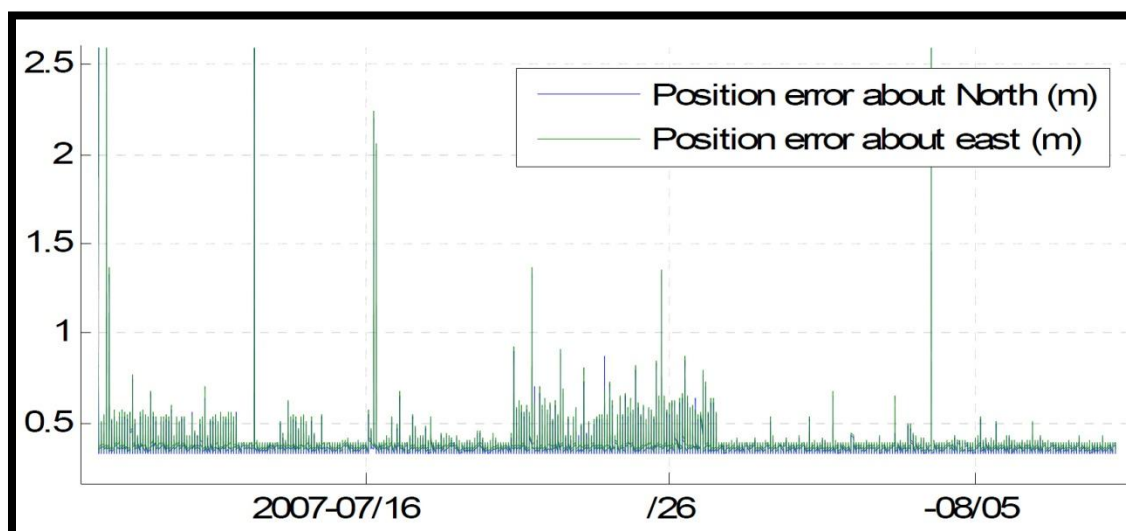


Imagen 40: Histórico de errores del sistema HAINs durante el mes de pruebas.

Fuente: [13] pág. 11.

En el último gráfico mostrado en la imagen 41 puede observarse la comparativa entre las mediciones realizadas por el equipo HAINs y por el HiPAP. Puede observarse la gran diferencia existente entre ambas, principalmente en la continuidad y estabilidad de las mediciones. Como ya dijimos, tanto en combinación con los sistemas GPS como con los sistemas acústicos, una de las características principales aportadas por los sistemas inerciales es la estabilidad y continuidad en la señal de salida. En este gráfico puede comprobarse dicha aportación, debida en este caso al relleno de los periodos en los que

el HiPAP no suministra posicionamiento y a la corrección mutua que ambos equipos realizan el uno sobre el otro.

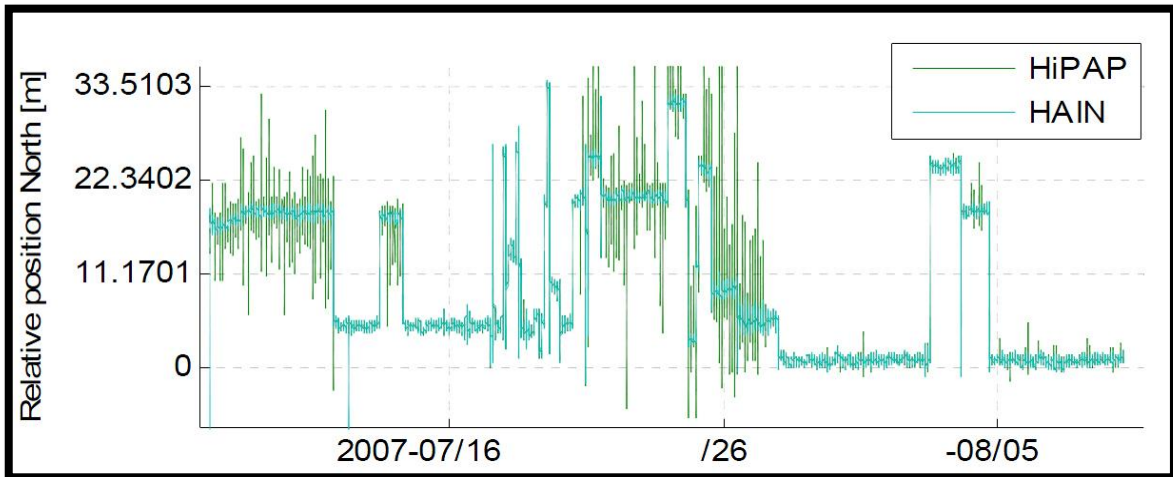


Imagen 41: Comparación entre las medidas del sistema HAIN con el sistema acústico.

Fuente: [13] pág. 11.

3.2.4 Conclusiones sobre los sistemas HAINs

Para cerrar este apartado, cabe destacar varias cuestiones. La primera de ellas creo que es realmente importante en cuanto al desarrollo de productos y equipos electrónicos de ayuda a la navegación. Como se ha explicado, hasta ahora los equipos acústicos ocupaban un secundario aunque fiable puesto dentro del reparto de importancia en el cálculo de la posición final en los equipos de posicionamiento dinámico debido a su baja frecuencia de salida de datos. Esto produce que equipos como el GPS acaparen gran parte de esa importancia. Y esto puede no resultar positivo. Evidentemente, depender totalmente o en gran parte de un solo equipo de posicionamiento que, además depende completamente del exterior, supone riesgos de gran importancia, y pese a ello, la mayoría de los buques del mundo dependen hoy en día de estos sistemas. La combinación de los sistemas acústicos con los inerciales supone solucionar este problema a bordo de los buques DP, quedando el peso del cálculo de la posición final más repartido y por lo tanto eliminando la dependencia que se tiene actualmente de equipos como el GPS. Por otra parte se ha demostrado que la combinación potencia las posibilidades individuales de ambos equipos, mostrando unos resultados sorprendentemente mejores que los alcanzados por cada equipo de manera individual. Esto supone un aumento de la eficacia en el posicionamiento de los buques y

plataformas que utilicen estos dispositivos, eficacia que se resume en menor consumo de combustible y menor demanda propulsora. Además, la eficacia no solo se produce a bordo del buque, sino que, como hemos explicado, se alarga la vida de las baterías de los transpondedores, las cuales, como debe suponerse, no son nada fáciles de reponer debido a las grandes profundidades a las que se encuentran. Por lo tanto esta combinación resulta en un aumento de la seguridad y la eficacia a bordo de buques de posicionamiento dinámico y es un ejemplo más del continuo desarrollo de equipos de ayuda a la navegación destinados a ofrecer mayores niveles de rendimiento a bordo de los buques mercantes.

3.3 Sistema de navegación inercial PHINS

Habiendo ya explicado prácticamente todo lo pretendido en el presente trabajo, debe aportarse ahora una prueba de que el sector del posicionamiento dinámico se ve realmente atraído por las ventajas que suponen los sistemas explicados en el mismo y sus combinaciones. Y esta prueba es el equipo de navegación inercial PHINS (Photonic Inertial Navigation System) desarrollado por la empresa iXBlue con la intención de aplicar en un solo equipo todas las combinaciones explicadas en el trabajo. En este último apartado se dará una visión general de este dispositivo a modo de resumen de las principales cuestiones tratadas.

3.3.1 Descripción general del sistema de navegación inercial PHINS

Como ya se comentó en la introducción del apartado, el sistema PHINS es un equipo de navegación inercial configurado para ser combinado con sensores exteriores al mismo. Entre estos sensores pueden encontrarse receptores GPS y equipos acústicos LBL y USBL, que como se ha explicado son aquellos sensores que combinados con los sistemas inerciales obtienen un mejor rendimiento, además de aceptar datos de las DVL (Doppler Velocity Log).

El equipo consiste en una caja con forma cúbica de 16 centímetros de lado y con un peso de 4 kilogramos. Dentro de dicha caja encontramos una IMU compuesta por tres FOG (Fiber Optic Gyro) y tres acelerómetros de gran precisión combinados con un procesador. El equipo se comunica con el exterior a través de tres conexiones, las cuales le permiten enlazar con un receptor GPS, un equipo acústico y una corredera Doppler

simultáneamente. Las señales provenientes de estos tres equipos son combinadas entre sí y con la salida de los sensores inerciales en un filtro Kalman que calcula y envía correcciones al sistema inercial, que es el encargado de calcular la posición final. En la siguiente figura podemos ver un diagrama donde se muestran las conexiones entre los sistemas.

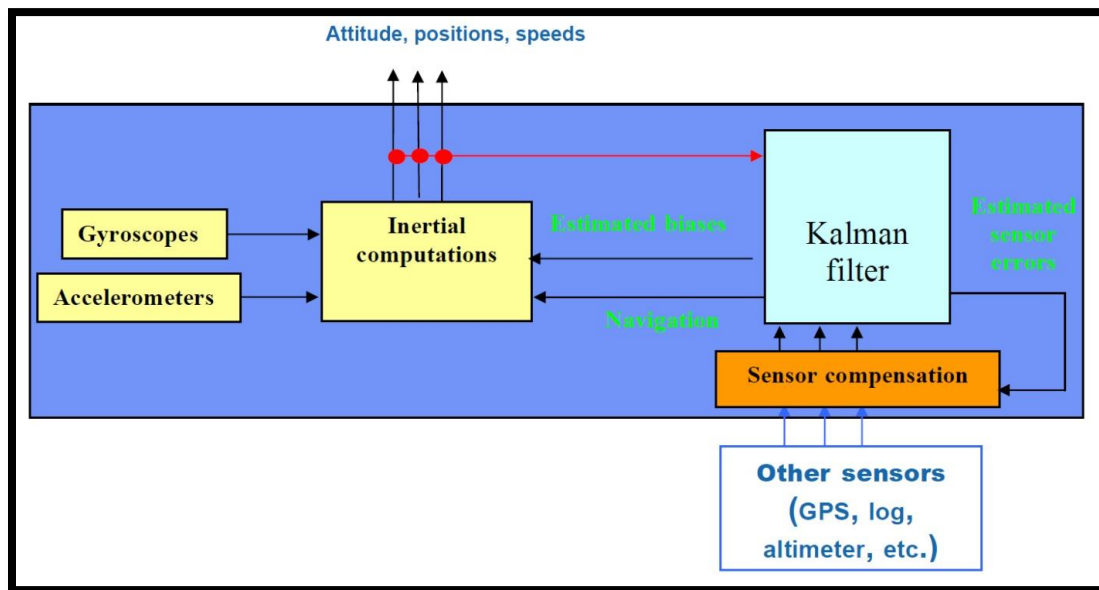


Imagen 42: Diagrama de bloques de un sistema PHINS

Fuente: [15] pág. 3.

Todo aquello que se encuentra dentro del rectángulo azul pertenece al equipo PHINS. Lo único exterior al equipo son las conexiones y los equipos que actúan como suministradores de posicionamiento al sistema. Estos equipos se comunican con el sistema PHINS a través del protocolo NMEA, protocolo estándar en la comunicación entre equipos de navegación en la actualidad.

En la imagen 43 podemos ver una posible arquitectura de combinación del sistema PHINS con el sistema de control DP. Este podría ser un caso de un buque DPS-1 con dos sistemas PRS independientes (DGPS y USBL) al que se le instala un equipo PHINS. Debe tenerse en cuenta que los datos aportados por el equipo PHINS al sistema de control DP son entregados como un solo dato de posicionamiento, es decir, a la hora de cumplir los requisitos de Clase DP sobre redundancia en los sistemas PRS, pese a que el PHINS sea alimentado por dos sensores, su salida será considerada como un único PRS.

Si puede darse el caso, como se ve en la imagen con el DGPS, que el mismo sistema utilizado para alimentar el PHINS sea utilizado como PRS individual que alimenta directamente al sistema de control.

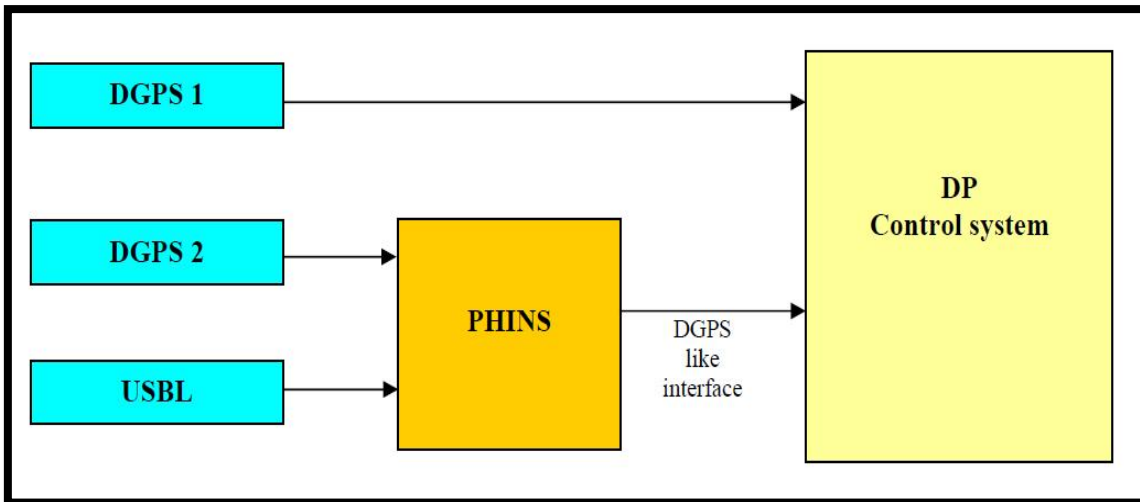


Imagen 43: Posible configuración de sistemas PRS junto con el PHINS en un sistema DP.

Fuente: [15] pág. 7.

Los aspectos teóricos de las combinaciones de sistemas que se dan en este equipo ya han sido explicadas en su mayoría en los apartados anteriores, por lo que no se desarrollarán en este párrafo. La única combinación que encontramos en este equipo y que no ha sido explicada es la que afecta a la corredera Doppler junto con el Sistema Inercial.

Una corredera Doppler es un dispositivo capaz de medir la velocidad a la que se traslada el buque mediante las mediciones realizadas por dos sensores situados en el fondo del buque, uno a proa y otro a popa, mediante el efecto Doppler. Los datos obtenidos por la corredera, al ser combinados con los datos inerciales, realizan la misma función que los datos aportados por el GPS o por los sistemas acústicos, pero afectando únicamente a la velocidad.

3.3.2 Eficacia del equipo PHINS

Las capacidades de este equipamiento vienen ligadas a las combinaciones explicadas en el trabajo. El sistema inercial del equipo, pese a ser de gran precisión, sigue viéndose afectado por el error exponencial debido a la integración, por lo que es un equipo en el

que la conexión con los receptores externos deberá considerarse obligatoria para la obtención de un posicionamiento de calidad. En la gráfica 44 podemos ver los resultados de 10 pruebas realizadas con el equipo PHINS trabajando sin conexiones a ningún receptor exterior. En ellas se pudo apreciar la desviación sufrida por el sistema trabajando únicamente con sus sensores inerciales.

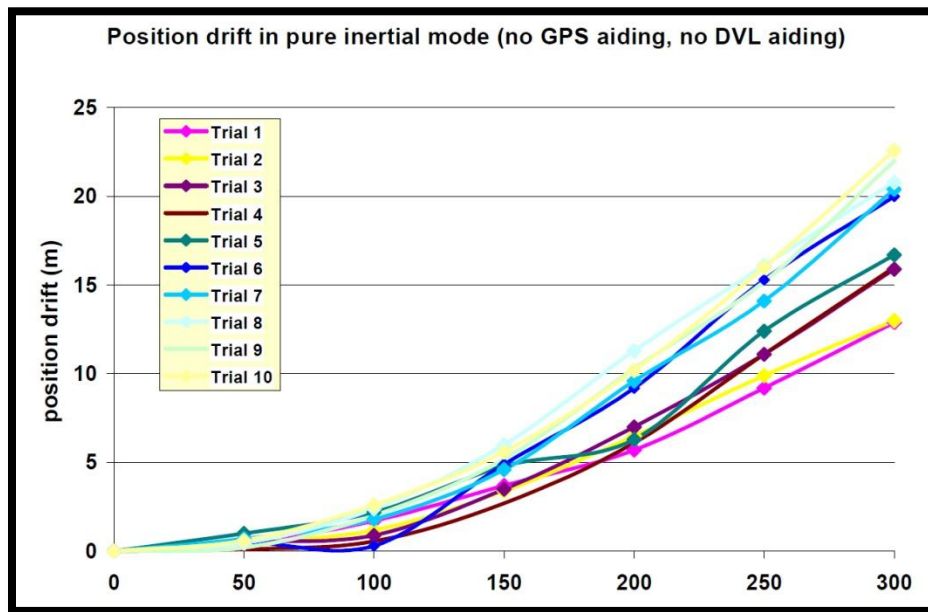


Imagen 44: Errores durante pruebas del equipo PHINS trabajando en solitario.

Fuente: [15] pág. 5.

Pero al conectar el sistema con los sensores exteriores, el comportamiento del sistema cambia por completo. Como puede verse en la imagen 45, las precisiones tanto en posición como en rumbo alcanzan valores realmente altos.

La precisión del equipo, tanto en la posición como en el rumbo, dependen de a qué sensores externos se encuentre conectado. Como vemos en la imagen 44, en cuando a precisión en la posición, reduce a un tercio el error mostrado por los equipos acústicos de manera individual, y si es utilizado con la corredera Doppler garantiza una precisión como mínimo mayor del 0,1 por ciento de la distancia recorrida. Evidentemente debe suponerse que un buque realizando maniobras DP no recorre grandes distancias. En cuanto al rumbo, al cabeceo y al balance, ofrece precisiones del orden de 0,01 grados. En la imagen 45 puede observarse la comparación entre los datos obtenidos por el PHINS y por el GPS al pasar por debajo de un puente, situación que, como ya se

comentó, puede causar cortes en la línea de visión de los satélites hacia el receptor GPS, ocasionando saltos en la posición.


PHINS 6000		
TECHNICAL SPECIFICATIONS		
PERFORMANCE		
Position accuracy ⁽¹⁾		
With USBL/LBL		Three times better than USBL/LBL accuracy
With DVL		0.1% of travelled distance
No aiding for 1 min/2 min		0.8 m/ 3.2 m
Heading accuracy ⁽²⁾⁽³⁾		
With GPS		0.01 deg secant latitude
With DVL/USBL/LBL		0.02 deg secant latitude
Roll and Pitch accuracy ⁽²⁾		0.01 deg
Heave accuracy		5 cm or 5% (whichever is greater)
OPERATING RANGE / ENVIRONMENT		
Operating / Storage Temperature		-20 to 55 °C / -40 to 80 °C
Rotation rate dynamic range		Up to 750 deg/s
Acceleration dynamic range		± 15 g
Heading / Roll / Pitch		0 to +360 deg / ±180 deg / ±90 deg
MTBF (computed/observed)		40,000/80,000 hours
No warm-up effects		
Shock and Vibration proof		

Imagen 45: Características de precisión y ambiente de trabajo del equipo PHINS 6000.

Fuente: <http://www.ixblue.com/sites/default/files/downloads/ixblue-ps-phins-06-2014-web.pdf>

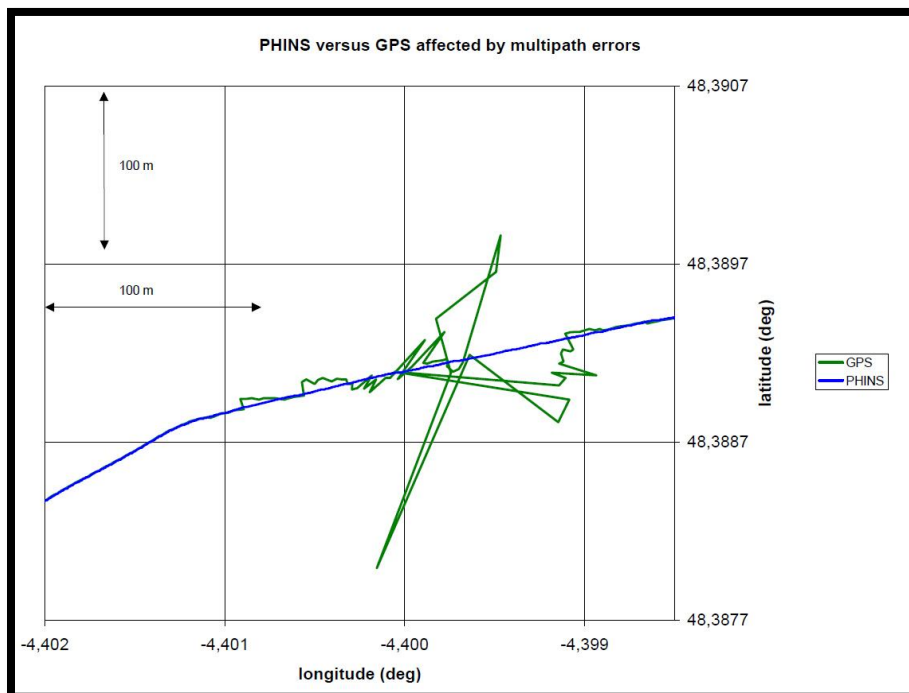


Imagen 46: Comparación entre las posiciones calculadas por el sistema PHINS y un receptor GPS al pasar por debajo de un puente.

Fuente: [15] pág. 6.

Esta gran precisión y el hecho de contar con diferentes combinaciones permite solventar algunos de los problemas comentados en este trabajo. El primero de ellos es el reparto equitativo dentro del cálculo de las posiciones entre los distintos dispositivos PRS basados en distintos principios de medida. El segundo es el aumento de seguridad comentado tanto en el apartado sobre equipos INS/GPS como en el de equipos acústicos.

3.3.3 Conclusiones sobre el sistema PHINS

En definitiva, en este equipo se aplican todas las ideas explicadas en el presente trabajo sobre la introducción de los sistemas inerciales como una herramienta clave para el aumento de la precisión y de la seguridad a bordo de buques con posicionamiento dinámico.

La gran precisión y robustez que aporta a las características de los equipos con los que se combina hacen que su instalación a bordo suponga una mejora sustancial del comportamiento del buque, con el consiguiente menor coste de explotación y el aumento de la seguridad ya comentados. La relativa novedad de estos sistemas hace que se encuentren todavía en fase de introducción a la industria, pero no cabe duda de que sus características son una garantía de que en un futuro se considerarán los sistemas inerciales como el PHINS como un elemento más en los puentes de los buques DP, e incluso en los buques convencionales.

Conclusiones

Capítulo I

Una vez terminado el trabajo y completada la exposición de las ideas que en él se pretenden recopilar, deben mencionarse a modo de conclusión una serie de ideas sobre cada capítulo. Sobre los sistemas de posicionamiento dinámico creo importante destacar la evolución que estos sistemas de ayuda a la navegación han tenido y siguen teniendo, incorporando novedosos equipos, como los inerciales, a su funcionamiento, haciendo que este sea más seguro y fiable. Cabe preguntarse si, con el desarrollo de estos sistemas y la tendencia hacia el denominado puente integrado en el diseño de nuevos buques, no encontraremos que, dentro de quizás no tantos años, los sistemas de posicionamiento dinámico sean un elemento más en el puente de los buques convencionales, jubilando así la mayor parte de la flota mundial de remolcadores. Y cabe preguntarse si, en el caso de que esto ocurriera, los futuros sistemas de posicionamiento dinámico contarán como medios de posicionamiento con alguno de los explicados en este trabajo, o por el contrario irán equipados con sistemas actualmente impensables a bordo de los buques, como pudo serlo la navegación inercial hace algunas décadas.

Pese a que las futuras evoluciones en estos sistemas nos son desconocidas, las actuales, y en concreto la introducción de los sistemas de navegación inercial parecen haber venido para quedarse, demostrando que aportan más seguridad, más fiabilidad y más eficacia en la explotación de estos sistemas.

Capítulo II

Como conclusión sobre los sistemas inerciales creo importante volver a destacar la que quizás sea su característica más relevante, su independencia de medios exteriores. En el ámbito marítimo actual, en el cual el desarrollo de los medios de navegación tiende de manera muy clara hacia la constante comunicación entre buque y otros sistemas externos, tanto para la seguridad como para la localización, se ha creado una gran dependencia del buque hacia dichos medios externos. En este contexto, el desarrollo de

la navegación inercial como método de posicionamiento independiente crea una herramienta que en los buques actuales en los que se aplica proporciona un aumento claro de la eficacia y de la seguridad, y quizás en un futuro permita contar con un sistema de navegación independiente que permita prescindir de equipos como el GPS.

Por ello creo que no debe verse a este método de posicionamiento como un complemento de los sistemas de posicionamiento dinámico, ya que, pese a que de momento ese parece ser su papel principal, no debe descartarse que en un futuro se estudie en las escuelas de náutica al igual que se estudian hoy en día el GPS o el A.R.P.A.

Capítulo III

Este último capítulo contiene las ideas fundamentales sobre las cuales se desarrolla el trabajo. Se ha intentado que los dos primeros capítulos sean una introducción tanto a los sistemas de posicionamiento dinámico como a los equipos de navegación inercial, introducción que permita posteriormente tratar su combinación en este capítulo final con un mayor conocimiento del tema. Como conclusión a este capítulo final rescato la idea la evolución del diseño de buques actuales hacia el puente integrado, presentada en la conclusión al primer capítulo, para resaltar la idea de que, habiendo desarrollado ya infinidad de medios de posicionamiento y comunicación, en la actualidad el desarrollo se centra no en equipos nuevos, sino en que los equipos existentes compartan su información, proporcionando de manera conjunta un rendimiento mayor del que aportan de manera independiente. Y con el desarrollo de equipos como el PHINS queda claramente definida esta tendencia hacia la comunicación y compartición de información, así como el destacado papel de los sistemas de navegación inercial como equipos de apoyo y mejora de otros sistemas actuales de posicionamiento.

Bibliografía

- [1] International Maritime Contractors Association. “Introduction to Dynamic Positioning”.
- [2] Germanischer Lloyd. 2013. “Rules for Classification and Construction. Dynamic Positioning Systems”.
- [3] A. Noureldin, T.B. Karamat, J. Georgy, “Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration” Editorial Springer, Londres. ISBN: 978-3-642-30465-1.
- [4] C.S. Chas, R. Ferreiro. “Introduction to Ship Dynamic Positioning Systems” Journal of Maritime Research, Vol.V. No.1, pp. 79-96, 2008, Santander. ISSN: 1697-4840
- [5] Det Norske Veritas. 2012. Recommended Practice DNV-RP-E306 “Dynamic Positioning Vessel Design Philosophy Guidelines”.
- [6] J.M. Villar, “Posicionamiento Dinámico, Principios, Características y Operaciones” Trabajo Fin de Grado 2012, ETS de Náutica, Universidad de Cantabria.
- [7] American Bureau of Shipping. 2012. “Guide for Dynamic Positioning Systems”
- [8] C. M. Torres, “Sistemas de Maniobra DP en la Mar” Proyecto de Fin de Carrera, Santa Cruz de Tenerife, 1999. Centro Superior de Náutica y Estudios del Mar, Universidad de La Laguna.
- [9] International Marine Contractors Association. 2007. IMCA M 103 Rev. 1 “Directrices para el diseño y la operación de embarcaciones con posicionamiento dinámico”
- [10] M. S. Grewal, A. P. Andrews, C. G. Bartone, “Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation and Integration” Third Edition, Editorial WILEY, New Jersey. ISBN: 978-1-118-44700-0.
- [11] D.H. Titterton, J.L. Weston, “Strapdown Inertial Navigation Technology” Second Edition. ISBN: 1-56347-693-2.
- [12] C. W. Marquis “Integration of Differential GPS and Inertial Navigation using a Complementary Kalman Filter” Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1993.
- [13] M. Berntsen, A. Olsen. “Hydroacoustic Aided Inertial Navigation System – HAIN A new reference for DP”. Procedimientos de la conferencia del Dynamic Positioning Committee, Octubre de 2007.
- [14] R. I. Stephens et al. “Integration of an Inertial Navigation System and DP”.

Procedimientos de la conferencia del Dynamic Positioning Committee, Octubre 2008.

[15] Y. Paturel. "PHINS, An All-In-One Sensor for DP Applications" Procedimientos de la conferencia del Dynamic Positioning Committee, Septiembre 2004.