

**UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
SECCION DE NAUTICA, MAQUINAS Y RADIOELECTRONICA NAVAL**

TRABAJO FIN DE GRADO.

**POSICIONAMIENTO DINÁMICO, FILTRO DE
KALMAN Y SU APLICACION AL BUQUE
OCEANOGRÁFICO ANGELES ALVARIÑO**

CRISTINA ROCES ÁLVAREZ

JUNIO 2016

DIRECTOR/ES

**JOSÉ AGUSTÍN GONZÁLEZ ALMEIDA
MARIA DEL CRISTO ADRIÁN DE GANZO**

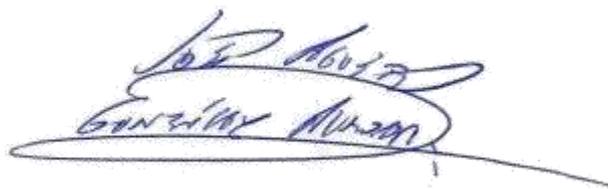
D. José Agustín González Almeida, Profesor Asociado del área de conocimiento de Construcciones Navales, perteneciente al Departamento de Ciencias de la Navegación, Ingeniería Marítima, Agraria e hidráulica de la Universidad de La Laguna certifica que:

D. Cristina Rocés Álvarez, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: "POSICIONAMIENTO DINÁMICO, FILTRO DE KALMAN Y SU APLICACION AL BUQUE OCEANOGRÁFICO ANGELES ALVARIÑO".

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente Certificado.

En Santa Cruz de Tenerife a 22 de junio de 2016.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Agustín González Almeida', with a long horizontal line extending from the end of the signature.

Fdo.: José Agustín González Almeida.

Director del trabajo.

D^a. María del Cristo Adrián de Ganzo, Profesora Asociada del área de conocimiento de Construcciones Navales, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna certifica que:

D. Cristina Rocés Álvarez, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: "POSICIONAMIENTO DINÁMICO, FILTRO DE KALMAN Y SU APLICACION AL BUQUE OCEANOGRÁFICO ANGELES ALVARIÑO".

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente Certificado.

En Santa Cruz de Tenerife a 22 de junio de 2016.



Fdo.: María del Cristo Adrián de Ganzo.

Director del trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE	II
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO DE TÉRMINOS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
OBJETIVOS	5
1. INTRODUCCIÓN	7
DP - COMPONENTES	9
2. PRS (POSITION REFERENCE SYSTEM)	12
2.1 DGPS (GPS DIFERENCIAL)	13
2.2 ACÚSTICA	14
2.3 TENSIÓN A TRAVÉS DE UN CABLE (LIGHT TAUT WIRE-LTW)	15
2.4 FANBEAM Y CYSCAN	16
2.5 ARTEMIS	16
2.6 DARPS (DIFFERENTIAL, ABSOLUTE AND RELATIVE POSITIONING SYSTEM)	18
2.7 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)	18
3. SENSORES	20
3.1 PRINCIPALES SENSORES	20
3.1.1 GIROCOMPASES Y/O COMPASES MAGNÉTICOS	20
3.1.2 IMU (UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL)	21
3.1.3 SISTEMA VRS	22
3.1.4 ANEMÓMETROS O SENSORES DE VIENTO	23
3.1.5 CORREDERA DOPPLER	24
4. FUERZAS Y MOVIMIENTOS BÁSICOS	25
4.1 PRINCIPIOS DEL SISTEMA	27
4.1.1 EL FILTRO DE KALMAN	27
5 EQUIPAMIENTO DE CLASES	39
5.1 NIVELES DE REDUNDANCIA	39
5.2 STATION KEEPING CAPABILITY	44

6. SISTEMA DP – B/O ÁNGELES ALVARIÑO	47
10. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Sistema de Posicionamiento Global Diferencial. Fuente: http://nptel.ac.in/courses/</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 2. Sistema de posicionamiento acústico. Fuente: www.shipseducation.com.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 3. Taut wire position. Fuente: http://www.shipseducation.com/info/offshore/dynamic-position-4.html...</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4. Posicionamiento Fanbeam (Laser). Fuente: http://www.guidance.eu.com/fanbeam-to-mk4-upgrade.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 5. Artemis position determination. Fuente: http://muco-technologies.nl/en/projects/artemis</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 6. Posicionamiento a través del sistema Artemis. Fuente: muco-technologies.nl.....</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 7. Posicionamiento D.A.R.P.S. Fuente: www.shipseducation.com</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 8. Ilustración 8. Posicionamiento GPS (Sistema satelital). Fuente: http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6290/Pablo%20Tom%203%20A1s%20Zamora%20Sarabia.pdf?sequence=1.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 9. Girocompás. Fuente: navegacion.tripod.com</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 10. UMI (Unidad de medición inercia). Fuente: wikipedia.org</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 11. Anemómetro. Ilustración 12. Indicador sensor de viento.</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 13. Corredera DOPPLER (Puente). Fuente: www.pandhmarine.com.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 14. DOPPLER log. Fuente: seatronics-group.com</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 15. Fuerza y movimientos básicos. Fuente: www.km.kongsberg.com</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 16. Pitch, roll and heave. Fuente: Manual Posicionamiento Dinámico (cPos).....</i>	<i>26</i>

<i>Ilustración 17. Diagrama del bloque del sistema DP. Fuente: Manual</i>	
<i>Posicionamiento Dinámico (cPos).....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 18. Diagrama Filtro de Kalman. Fuente: Manual Posicionamiento</i>	
<i>Dinámico (cPos)</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 19. Típicas rutinas de sistema de posicionamiento de referencia pre-</i>	
<i>procesamiento. Fuente: http://dynamic-positioning.com/</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 20. Esquema simplificado del Filtro de Kalman. Fuente: http://dynamic-</i>	
<i>positioning.com/</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 21. Circuito del Filtro de Kalman. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 22. Evolución de la incertidumbre de la posición con el tiempo estimado.</i>	
<i>Fuente: http://dynamic-positioning.com/</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 23. Redundancia en la propulsión. Fuente:</i>	
<i>http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1414/Jos%E9%20Manuel%20Villar.pdf?sequence=1</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 24. Configuración Estándar. Fuente: www.moxa.com</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 25. DP Classes (Clases de Posicionamiento Dinámico según operaciones).</i>	
<i>Fuente: http://dynamic-positioning.com/</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 26. Control DP "B/O Ángeles Alvariño". Fuente: Elaboración Propia.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 28. Roseta muestreo de agua. Fuente: Propia.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 28. Recogida de boya ODAS. Fuente: Propia.</i>	<i>50</i>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

DARPS	Differential, Absolute and Relative Positioning System.
DGPS	Differential Global Positioning System.
DP	Dynamic Positioning.
DPO	Dynamic Positioning Operator.
FPSO	Flotantes de Producción, Almacenamiento y Descarga
HF	High Frequency.
HPR	Hydroacoustic Position Reference.
IEO	Instituto Oceanográfico Español.
IMO	International Maritime Organisation.
IMU	Inertial Measurement of Unit.
LBL	Long Base Line.
LF	Low Frequency.
LQE	Estimación Cuadrática Lineal.
MSC	Maritime Safety Committee.

NAVSTAR	Navigation Satellite Timing and Ranging.
NMD	Norwegian Maritime Directorate.
OMI	Organización Marítima Internacional.
PRS	Positioning Reference System.
ROV	Remote Operated Vehicle.
SBL	Short Base Line.
SPD	Sistema Posicionamiento Dinámico.
USBL	Ultra Short Base Line.

RESUMEN

Este trabajo realiza una breve introducción acerca del Posicionamiento Dinámico (DP), estudiando los antecedentes del mismo, así como los motivos que me llevaron a realizar un trabajo con dicha temática, sobre la cual prácticamente desconocía hasta que realice prácticas en el buque oceanográfico Ángeles Alvariño.

Cuando hablamos de PRS (Position Reference System) o Sistema de Referencia de la Posición, hacemos referencia a los distintos medios que se usan hoy en día para la determinación de la posición de un barco. Debido a que los métodos de posición tradicionales no son muy precisos, en estas últimas décadas se han desarrollado distintos tipos de sistemas de posicionamiento dinámico que explico en este trabajo, incluyendo: DGPS (Diferencial GPS), acústica, tensión a través de un cable (Light taut wire, LTW), Fanbeam y CyScan, Artemis, DARPS (Differential, Absolute and Relative Positioning System) y GPS.

Trataremos asimismo, los principales sensores, características y lugares en que se emplean. Explicaré brevemente el funcionamiento y la composición de los sensores, así como los principales sensores que podemos encontrar en un buque equipado con posicionamiento dinámico, como: Girocompases y/o compases magnéticos, IMU (Unidad de medición inercial), VRS, anemómetros o sensores de viento y corredera DOPPLER.

También trataremos las fuerzas y movimientos a las que es sometido un buque que navega; explicando los principios del sistema, con especial hincapié dentro del DP, al Filtro de Kalman, puesto que considero que es la base del sistema de posicionamiento dinámico, conjuntamente con el Modelo Matemático y la covarianza asociados.

Respecto al equipamiento de clases, encontramos los niveles establecidos por OMI, en los que son clasificados los distintos niveles de DP, en función del tipo de operaciones a realizar. Finalmente, hablaremos de los niveles de redundancia y del "Station Keeping Capability" (Capacidad de mantener de forma automática la posición y el rumbo de un buque).

ABSTRACT

This paper makes a brief introduction on the Dynamic Positioning (DP), studying the history of it, and the reasons that led me to do a project with this theme, on which practically unknown until I started my internships as a deck cadet in the Research/Survey vessel “Ángeles Alvariño”.

When we talk about PRS (Position Reference System), we are referring to the various means used today for determining the position of a ship. Because traditional methods of position are not very accurate, in recent decades different types of dynamic positioning systems have been developed, including: DGPS (Differential GPS), acoustic, voltage through a cable (Light taut wire, LTW), Fanbeam and CyScan, Artemis, DARPS (Differential, Absolute and Relative Positioning System) and GPS.

We will deal on the main sensors, features and fields they are used. Following, we will briefly explain the functioning and composition of the sensors and the main sensors that can be found in a vessel equipped with dynamic positioning, such as gyros and/or magnetic compasses, IMU (inertial measurement unit), VRS, anemometers or sensors DOPPLER wind and sliding.

Later on, touching forces and movements which undergoes a vessel navigating; explaining the principles of the system, with particular emphasis within the DP, the Kalman filter, since I believe that is the basis of dynamic positioning system, together with the mathematical model and the associated covariance.

Regarding the equipment class, we find the levels established by IMO, where the different levels of DP are classified, depending on the type of operations to perform. Finally, we will discuss levels of redundancy and the "Station Keeping Capability" (Ability to automatically maintain the position and direction of a ship).

OBJETIVOS

Los objetivos perseguidos a la hora de desarrollar este trabajo de fin de grado, son los recogidos a continuación:

- 1
 - Conocer los antecedentes del DP y las fuentes de datos de los que se alimenta el sistema.
- 2
 - Tratar los distintos tipos de sensores a bordo y centrarnos en aquellos que conciernen al DP.
- 3
 - Describir las fuerzas y movimientos básicos a los que es sometido un buque en navegación y su procesado mediante la aplicación del Filtro de Kalman.
- 4
 - Conocer la importancia de la relación entre el equipamiento de clases y la redundancia.
- 5
 - Conocer como se aplica el DP a un buque real, como es el caso del buque Oceanográfico "Ángeles Alvariño".

1. INTRODUCCIÓN

Cuando nos referimos al término de Sistema de Posicionamiento Dinámico, hacemos referencia a:

“Un sistema capaz de, automáticamente, controlar la posición y proa de un determinado buque o plataforma mediante el empuje de sus equipos propulsores y acción de su sistema de gobierno.” (SANTAMARÍA s.f.)

Podemos decir del DP (Dynamic Positioning, en español Posicionamiento Dinámico), que es una herramienta altamente desarrollada y bien establecida en el negocio marítimo, en particular, utilizado en “offshore”. Esta herramienta se ha ido implantando con rapidez en el ámbito marítimo, y ha avanzado mucho en muy poco tiempo, con un gran potencial de expansión futuro.

En contra de lo que se piensa, el DP no es algo reciente, debemos retrotraernos hasta los años 60, donde se empezó a implementar en los buques perforadores; sin embargo no sería hasta finales de los años 70 y principio de los 80, cuando se empezó a extender el uso del DP, equipando un mayor número de buques con este sistema.

Hoy día, el posicionamiento dinámico se usa en buques y plataformas “offshore” de todo tipo; desde cableros a buques “supplier”, pasando por buques de asistencia y reparación en alta mar. En cuanto a las plataformas, se empezó a aplicar el sistema de posicionamiento dinámico cuando, en un momento dado, las empresas petrolíferas tuvieron que perforar pozos a cada vez mayor profundidad, del orden de 3000 metros, donde mantener la posición mediante anclas era imposible.

El sistema de posicionamiento dinámico es un sistema informatizado de control para la posición, el rumbo y el control automático de un buque.

Para controlar el rumbo del barco, el sistema de control de DP utiliza datos de uno o más giroscopios, mientras que al menos un sistema de posición de referencia permite que el sistema de control de posicionamiento dinámico fije la posición del buque. Los PRS (Position Reference System) son los encargados de suministrar la información acerca de la posición del buque, ya que la precisión requerida es mayor

que las normalmente utilizadas para la navegación convencional; encontrándose en el caso del DP, en un rango de 1m o menos. Los PRS son independientes unos de otros, que a su vez, están conectados de manera independiente al ordenador del controlador DP.

Las desviaciones del rumbo o posición deseada se detectan automáticamente y a continuación, se realizan ajustes en el sistema para corregir dichas desviaciones.

Los puntos de ajuste de rumbo y la posición son especificados por el operador y luego se procesan por el sistema de control de DP para proporcionar señales de control al propulsor del barco y los principales sistemas de hélice. El sistema de control de DP siempre asigna un empuje óptimo a cualquiera de las unidades de propulsión que estén en uso.

El sistema de control de DP también proporciona un control de palanca manual que puede ser utilizado para el control aislado o para el control manual / automático combinado.

Sin un sistema de posición de referencia, el sistema de control de DP puede proporcionar una estabilización automática y control del rumbo del barco usando la giroscópica como referente del rumbo.

Dentro del DP (Posicionamiento Dinámico) la parte principal del mismo es el denominado **"Filtro de Kalman"**. En la aplicación del DP, el Filtro de Kalman nos permite estimar el estado del buque (Para lo cual se ha desarrollado un modelo de dinámica) basado en mediciones de ruido de sistemas de referencia y sensores.

DP - COMPONENTES

Los componentes principales en los que se basa un sistema de posicionamiento dinámico (SPD), basándose en el “Sistema de Posicionamiento Dinámico (SPD) y operaciones offshore; Incorporación de tecnologías avanzadas” (BLANCO 2011). Cualquier sistema de posicionamiento dinámico está configurado por los siguientes sistemas y equipos:

- **Sistemas de referencia:** De estos sistemas obtenemos la información necesaria para mantener la posición y la proa, e incluso, para seguir la derrota que queramos. Podemos dividir los sistemas de referencia en aquellos que se utilizan para el control de la proa y por otro lado, para los que controlarán la posición.

Cuando hablamos del control de la posición, hacemos referencia a los PRS (Positioning Reference Systems), de los cuales hablaremos más adelante en mayor profundidad, pero principalmente, los más utilizados son los siguientes:

- Sistemas satelitales (GPS Diferencial)
 - Sistemas electromecánicos (Tautwire)
 - Sistemas con base en ondas radar (Artemis)
 - Sistemas hidroacústicos (USBL, SBL o LBL)
 - Sistemas láser (Fanbeam o el Cyscan)
-
- **Sensores de medición:** A la hora de fijar una posición, habrá agentes externos que nos impidan hacer las maniobras de posicionamiento con facilidad, y por lo tanto, el buque se verá afectado por el viento, la corriente y el oleaje. Debemos saber las intensidades y direcciones de estos parámetros para que se pueda ejercer una fuerza igual y contraria a la que se está sometiendo el buque, a fin de que el buque pueda mantener fija su posición contrarrestando dichas fuerzas. Por ello, deben estar monitorizados los datos provenientes de

dichos sensores de forma continua, para que el DPO (Dynamic Positioning Operator) tengo conocimiento de las condiciones meteorológicas en todo momento.

- Otro de los componentes de un DP, es el equipo de propulsores y de gobierno. Se necesita un sistema de propulsión y gobierno que sea eficiente y tenga la fuerza necesaria para poder controlar la totalidad de movimientos del buque en el plano horizontal.
- En cuanto a los sistemas de generación, distribución y gestión de la energía, son los sistemas que se encargan de suministrar la energía que sea necesaria para que, el equipo de propulsores y gobierno, puedan contrarrestar las fuerzas de las condiciones meteorológicas recibidas a través de los sensores de medición.
- El modelo fundamental del sistema de posicionamiento dinámico es el **modelo matemático del buque**. Este modelo es un algoritmo que funciona a través del ordenador central. Este modelo es el encargado de proporcionar los datos de fuerzas y acciones que se deben aplicar con el fin de contrarrestar las fuerzas a las que se somete el buque, a realizar a través de cada uno de los propulsores y timones.

2. PRS (POSITION REFERENCE SYSTEM)

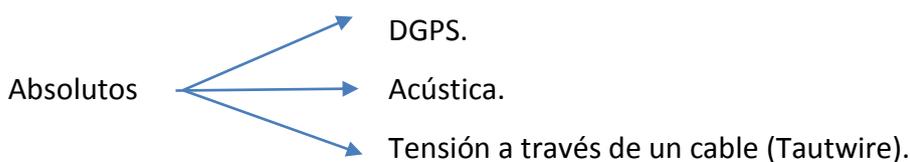
Hay varios medios para determinar la posición de un barco en alta mar, aunque la mayoría de los métodos tradicionales que se utilizan para los buques de navegación no son lo suficientemente precisos para las exigencias del posicionamiento dinámico. Para lograr una mayor precisión, durante estas últimas décadas se han desarrollado distintos sistemas de posicionamiento. Los siguientes sistemas de DP son los más conocidos: Kongsberg Maritime, Navis Engineering Oy, Wärtsila, Rolls-Royce, Praxis Tecnología de Automatización, etc...

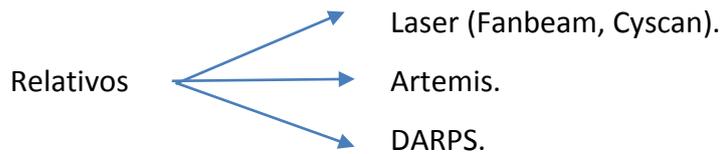
La capacidad de aplicar uno u otro dependerá además del trabajo a realizar, de la profundidad de la zona donde se procederá a su explotación.

Un buque equipado con DP debe estar equipado con una buena referencia de posición y con sensores de acuerdo con la notación de las clases de DP del buque y de las operaciones a realizar. Los sistemas de referencia de posición deben seleccionarse con la debida consideración a la operativa, tanto con respecto a las restricciones causadas por la manera de despliegue y actuación en situaciones de trabajo.

Los sistemas de referencia de posición comprenden sistemas absolutos y relativos. Un sistema absoluto da al buque una posición geográfica, dando la posición del buque en relación con una referencia no fija. Un sistema relativo puede utilizarse como un sistema absoluto si se instala en un punto de posición geográfica fija. Un sistema absoluto acústico se puede utilizar como un sistema relativo si se une a una posición no fija.

Los siguientes sistemas de referencia de posición más comunes en uso, son los siguientes:





2.1 DGPS (GPS DIFERENCIAL)

Cuando se obtiene la posición a través del GPS, debido a la imprecisión de la información, esta se debe mejorar con una segunda referencia, la referencia fija que se encuentra en tierra (estación diferencial) y cuya función es comparar la posición GPS con la posición conocida de la estación, de lo contrario, la primera posición recibida del GPS, si no se contrastase con la estación diferencial, no podríamos siquiera contemplar usarla para el posicionamiento dinámico, debido a la poca precisión que tendría. Puede existir un error, que sería la diferencia entre la posición obtenida por el satélite y la obtenida por la base terrestre. Una vez realizada la doble comprobación, dicha corrección se envía al receptor DGPS por onda larga de radio frecuencia. Aunque la precisión es mejorada, sigue sin ser suficientemente preciso para el uso en aplicaciones DP, precisando de una precisión aún mayor para garantizar una mayor fiabilidad. Empresas como “Veripos”, “Fugro” o “C&C Technologies” suministran señales diferenciales a través de satélite, lo que permite la combinación de varias estaciones diferenciales.

- Las principales **ventajas** del DGPS son: que está casi siempre disponible, tiene una integridad del orden de pocos segundos y una mayor exactitud en la posición.
- Las **desventajas** incluyen la degradación de la señal por perturbaciones atmosféricas, bloqueo de la señal satelital por grúas o estructuras metálicas y deterioro de la señal.

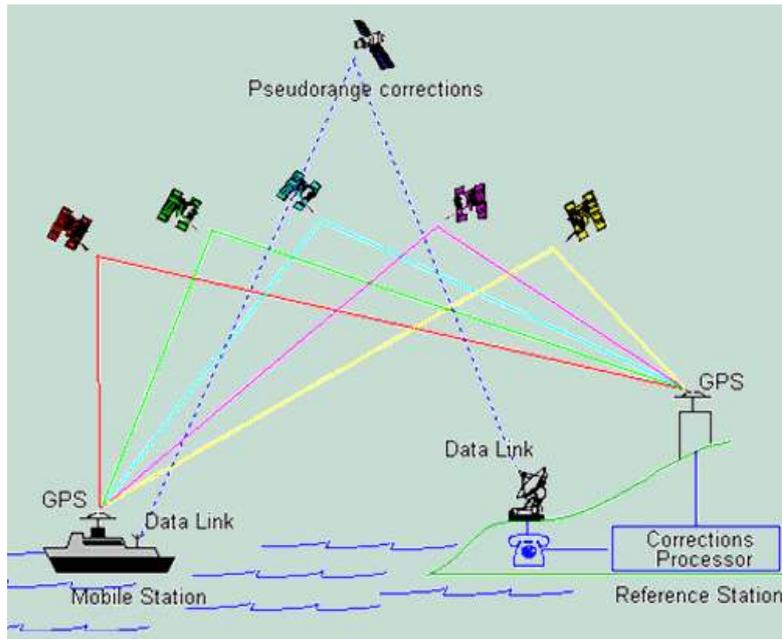


Ilustración 1. Sistema de Posicionamiento Global Diferencial. Fuente: <http://nptel.ac.in/courses/>

2.2 ACÚSTICA

Este sistema consiste en uno o más transpondedores colocados en el lecho marino y un transductor colocado en el casco del buque. El transductor envía una señal acústica al transpondedor, que se activa para responder. Conocida la velocidad del sonido a través del agua, podemos obtener la distancia. Debido a que hay muchos elementos en el transductor, es posible determinar la dirección de la señal del transpondedor. Con ello, se puede determinar la posición del buque respecto del transpondedor. Éste método es vulnerable al efecto del ruido de los propulsores u otros sistemas acústicos, resultando su principal desventaja. El uso está limitado en aguas poco profundas debido a la curvatura de los rayos que se produce cuando el sonido viaja a través del agua horizontalmente. Se utilizan comúnmente tres tipos de sistemas de HPR, los cuales solo nombraremos, puesto que no interesa profundizar mucho en los sistemas PRS sino conocer una base:

- Línea base ultra corta (USBL – Ultra Short Base Line)
- Línea base larga (LBL – Long Base Line)
- Línea base corta (SBL – Short Base Line)

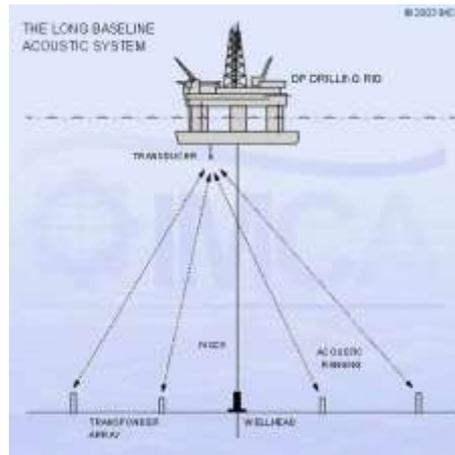


Ilustración 2. Sistema de posicionamiento acústico. Fuente: www.shipseducation.com

2.3 TENSIÓN A TRAVÉS DE UN CABLE (LIGHT TAUT WIRE-LTW)

Proporciona una manera extremadamente precisa de medir la posición del barco en relación con el grupo de peso en el lecho marino a profundidades de hasta 500 metros. Se hace un montaje de la grúa en la cubierta, y un peso depresor en un alambre rebajado por un cabrestante de tensión constante. El cable se mantiene tenso y el ángulo del hilo se mide por un inclinómetro. A medida que el barco se mueve, el ángulo de los cambios de alambre. La posición relativa de la embarcación con el grupo de peso en el fondo del mar se calcula utilizando la profundidad del agua y el ángulo de alambre. Estos ángulos se corrigen en el cable en tensión o por el sistema de control de DP para inclinaciones de los vasos (ángulos de balanceo y cabeceo y movimiento).

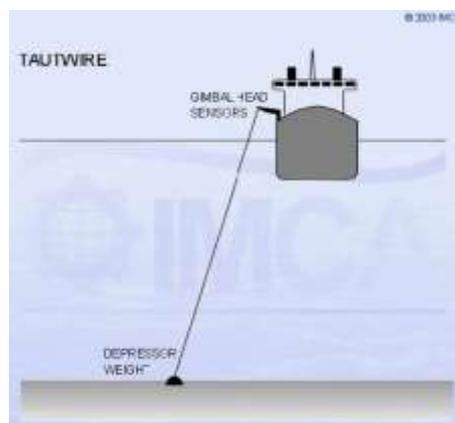


Ilustración 3. Taut wire position. Fuente: <http://www.shipseducation.com/info/offshore/dynamic-position-4.html>

2.4 FANBEAM Y CYSCAN

Estos son sistemas de referencia de posición en base láser. Es un sistema muy sencillo, ya que solo se necesita tener instalado un pequeño prisma en una estructura o barco cercano. Los riesgos son el sistema de bloqueo en otros objetos que reflejan y el bloqueo de la señal. El alcance depende de las condiciones meteorológicas, pero normalmente es de más de 500 metros.

El sistema láser de referencia de posición para sistemas DP Fanbeam lleva liderando el mercado más de 20 años, gracias a su resistencia, alto rendimiento en condiciones adversas y facilidad de uso para los operadores de posicionamiento dinámico (DPO).



Ilustración 4. Posicionamiento Fanbeam (Laser). Fuente: <http://www.guidance.eu.com/fanbeam-to-mk4-upgrade>

2.5 ARTEMIS

Este sistema es capaz de posicionar a un buque tomando demora y distancia al barco. El sistema se compone por dos antenas que cuando se alinean, transfieren datos de distancia y demora mediante microondas. Una de las antenas es móvil, posicionada en el barco, y la otra es fija situada en tierra. Sus rangos de cobertura son entre los 10 y los 30 Km. Por otro lado, tiene una cobertura de 360° y tiene una buena precisión ya que ésta es de 5 cm si la alineación de las antenas es menor a los 3 Km y de 15cm si las antenas se encuentran a 30 Km. (Sarabia 2014)

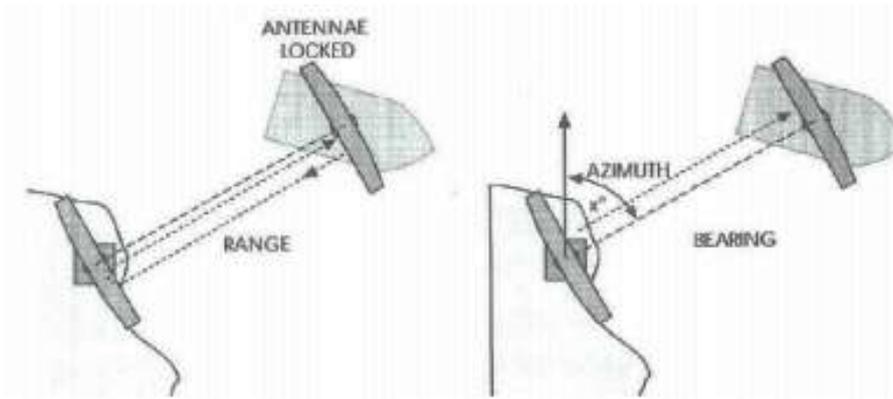


Ilustración 5. Artemis position determination. Fuente: <http://muco-technologies.nl/en/projects/artemis>

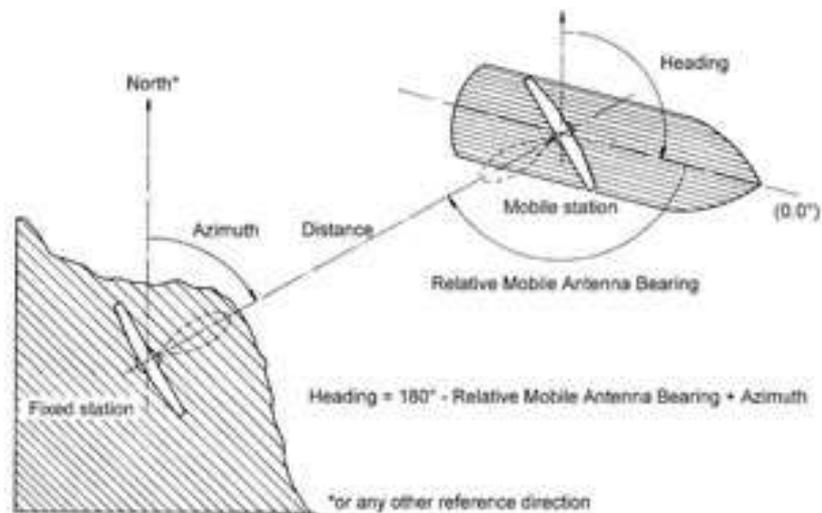


Ilustración 6. Posicionamiento a través del sistema Artemis. Fuente: muco-technologies.nl

Un sistema basado en el radar, donde una unidad se coloca sobre una estructura cercana y dirigida a la unidad a bordo del buque. Las ventajas son la fiabilidad y el rendimiento en cualquier tipo de clima. La desventaja es que la unidad es demasiado pesada.

2.6 DARPS (DIFFERENTIAL, ABSOLUTE AND RELATIVE POSITIONING SYSTEM)

Posicionamiento del sistema de forma diferencial, absoluto y relativo. Comúnmente utilizado en buques cisterna mientras se carga de un FPSO (Flotantes de producción, almacenamiento y descarga). Ambos tendrán un receptor GPS. Como los errores son los mismos para ambos, la señal no necesita ser corregida. La posición de la FPSO se transmite a la cisterna lanzadera, por lo que una distancia y la demora se pueden calcular y se introduce en el sistema de DP.

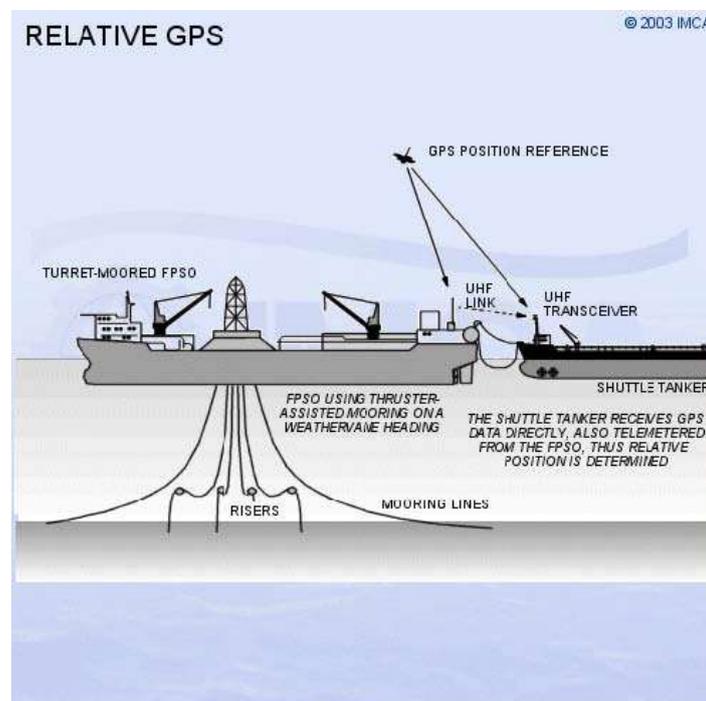


Ilustración 7. Posicionamiento D.A.R.P.S. Fuente: www.shipseducation.com

2.7 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

El sistema de posicionamiento global nos permite determinar nuestra posición en cualquier parte de globo terrestre. Sabemos que el GPS marino más utilizado a día de hoy es el Navstar GPS de origen estadounidense.

Según la Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics (GPS.gov 2016), el sistema GPS lo forman 24 satélites (21 satélites operacionales y 3 de repuesto) que se encuentran en órbita a una altura de 20.000 km.

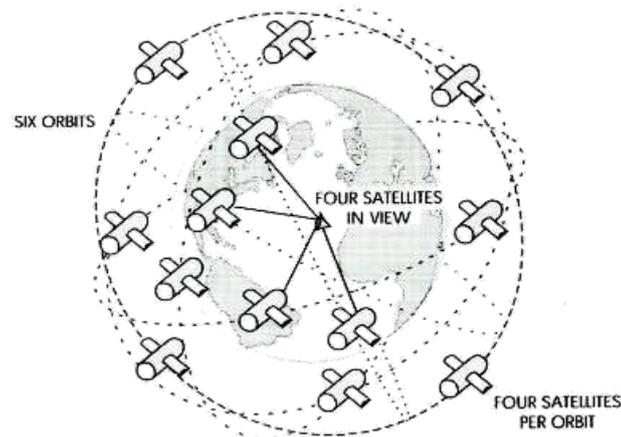


Ilustración 8. Ilustración 8. Posicionamiento GPS (Sistema satelital). Fuente: <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6290/Pablo%20Tom%C3%A1s%20Zamora%20Sarabia.pdf?sequence=1>

Son del tipo NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging). Cada satélite emite en dos señales de banda L, señales de radio que contienen códigos de distancia, los parámetros de efemérides y la información de sincronización Tiempo Universal Coordinado (UTC). Estas señales en banda L son llamadas L1 y L2, se encargan de transportar los mensajes de los satélites con información en cuanto al movimiento y estado de los mismos, y también para medir los retrasos producidos en la señal en su viaje del satélite al navegador del receptor.

3. SENSORES

Cuando hablamos en general de los sensores, estamos englobando cualquier tipo de sensor, y por lo tanto, cuando nos referimos a los sensores de un sistema de posicionamiento dinámico, deberíamos de hablar de transductores. Por estar tratando el tema de posicionamiento dinámico, vamos a centrarnos en los transductores con salida a modo de señal eléctrica, teniendo en cuenta que existen transductores cuya señal de salida no es eléctrica. Los transductores son capaces de transformar una magnitud física entrante en una señal eléctrica codificada saliente. En un transductor, diferenciamos tres partes; el captador, el bloque de tratamiento de señal y la etapa de salida (Sarabia 2014).

- El captador convierte la señal en variaciones de las magnitudes físicas entrantes.
- Bloque de tratamiento de señal se encarga de filtrar, amplificar, linealizar y modificar la señal que se obtiene del captador.
- La etapa de salida adapta la señal a las necesidades de la carga exterior.

3.1 PRINCIPALES SENSORES

Habiendo descrito brevemente los transductores, a continuación, ejemplificaré y describiré los principales sensores que podemos encontrar a bordo de un buque.

3.1.1 GIROCOMPASES Y/O COMPASES MAGNÉTICOS

Uno de los sensores principales es el girocompás, puesto que nos da el rumbo en cualquier momento. Este es, en esencia, un giróscopo, es decir, una rueda giratoria cuyo eje se encuentra libre para así, poder orientarse en cualquier dirección. La

esencia de un girocompás es la necesidad de un mecanismo que aplique un par de giro siempre que el eje del mismo no se encuentre señalando al norte. Para lograr este par de giro, se usan dos métodos, uno con fricción, con lo cual el giróscopo deja de estar totalmente libre. El segundo método, que también es el más utilizado, es usando pesos para así forzar el eje a su permanencia en horizontal, pero, al contrario que el anterior método, permitiéndole rotar libremente dentro del plano horizontal.

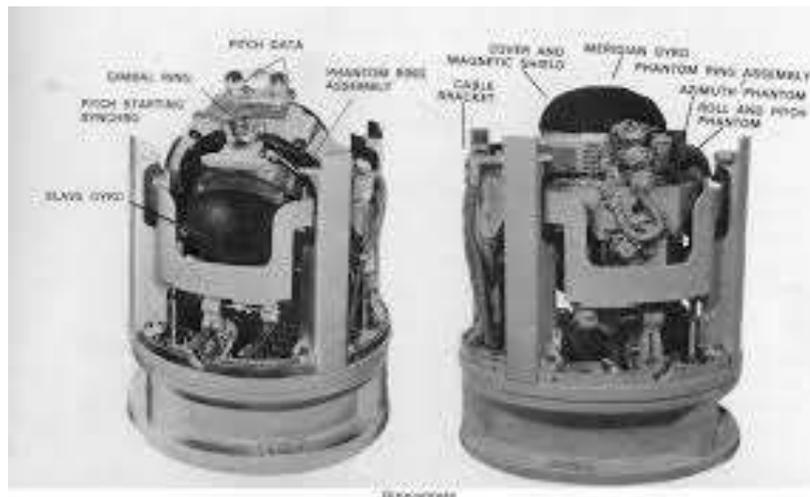


Ilustración 9. Girocompás. Fuente: navegacion.tripod.com

3.1.2 IMU (UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL)

Me he basado en la Wikipedia (GPS.gov 2016), para poder definir que una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Unit), es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.

La IMU es el componente principal de los sistemas de navegación. Esto se debe a que los datos obtenidos por dichos sensores son los que permiten al buque mantener la posición del aparato a través de la navegación por estima.

Cuando aplicamos los sensores IMU a un buque, los datos que nos proporciona son alimentados en un computador, que será el que se encargue de calcular su posición actual basándose en datos como la velocidad, dirección y tiempo.



Ilustración 10. UMI (Unidad de medición inercia). Fuente: wikipedia.org

Cabe destacar que tiene alguna desventaja, como por ejemplo que estas se suelen ver afectadas por un error acumulativo. Esto se debe a que el sistema se encuentra de forma continua agregando los cambios que se van detectando a las posiciones previamente calculadas, cualquier error en la medición se acumulará de un punto al siguiente. Con esta acumulación de errores, llegamos a lo que denominamos “deriva”, es decir, una diferencia que aumenta siempre entre la posición estimada y la posición verdadera.

3.1.3 SISTEMA VRS

La unidad de referencia vertical instalada a bordo de un buque determina la diferencia entre la vertical local y el plano de referencia del mismo. Los datos obtenidos se utilizan más para el posicionamiento que para el propio mantenimiento del rumbo.

Debe haber al menos un sensor de referencia vertical (VRS) activado en todo momento para proporcionarle al sistema la información de cabeceo y balanceo. Esta información se utiliza para ajustar las mediciones recibidas desde la posición de referencia de sistema de cabeceo y balanceo del buque. Si un VRS está equipado con un sensor de movimiento vertical, la información de movimiento vertical se utilizará

para fines de control. Si se pierde la información del VRS, el sistema será incapaz de compensar la posición recibida con las mediciones de movimiento de la embarcación.

La capacidad de posicionamiento del sistema podría entonces degradarse. Normalmente, todos los sensores de referencia verticales disponibles estarán habilitados para su uso. El sistema después, recibe y compara las señales de todos los sensores de referencia vertical, pero utiliza solamente una de las señales. El VRS puede definir qué información se prefiere para su uso por el sistema. Si no hay errores detectados en las mediciones de VRS, el sistema siempre utilizará el sensor preferido. Los sensores de referencia verticales, se activan y se desactivan.

3.1.4 ANEMÓMETROS O SENSORES DE VIENTO

En un buque, cuya función depende del posicionamiento dinámico, uno de los sensores que deben tener bastante precisión, es el anemómetro. Esto se debe a que a través de la información recibida por el sensor de viento, el modelo matemático, como ya vimos anteriormente, va a actuar dando la orden de contrarrestar esta fuerza dependiendo del dato y la información recibida.

Los anemómetros miden el componente horizontal de la velocidad del viento, y se caracterizan por la precisión, la resistencia al agua marina, y su composición de materiales robustos. Normalmente, suele haber más de un sensor de viento, puesto que estos se desregulan con frecuencia.



Ilustración 11. Anemómetro.
Fuente: equipomarino.com



Ilustración 12. Indicador sensor de viento.
Fuente: www.nauticexpo.com

3.1.5 CORREDERA DOPPLER

Es un sensor que mide la velocidad y distancia del buque con respecto al fondo, mediante la aplicación del denominado efecto Doppler (se trata de aumento o disminución de la frecuencia que se produce en una onda sonora cuando el emisor que la genera y el receptor la capta se alejan o aproximan uno del otro).

Hay algunas correderas que necesitan un sensor que sobresale de la quilla del barco. La información se mide a través de haces sónicos pareados de 1 MHz de frecuencia, mantiene la precisión de las mediciones adquiridas sin que afecte el cabeceo o el balanceo del buque.



Ilustración 13. Corredera DOPPLER (Puente). Fuente: www.pandhmarine.com



Ilustración 14. DOPPLER log. Fuente: seatronics-group.com

4. FUERZAS Y MOVIMIENTOS BÁSICOS

Un buque en navegación marítima está sometido a múltiples fuerzas externas: viento, olas y corrientes principalmente; así como fuerzas y momentos generados por el sistema de propulsión del buque.

El sistema de control de DP calcula las fuerzas que los propulsores deben producir con el fin de controlar el movimiento del buque en los distintos grados de libertad. Un buque cuenta con seis ejes sobre los que experimenta movimiento, tres de los cuales son de rotación y tres de traslación.

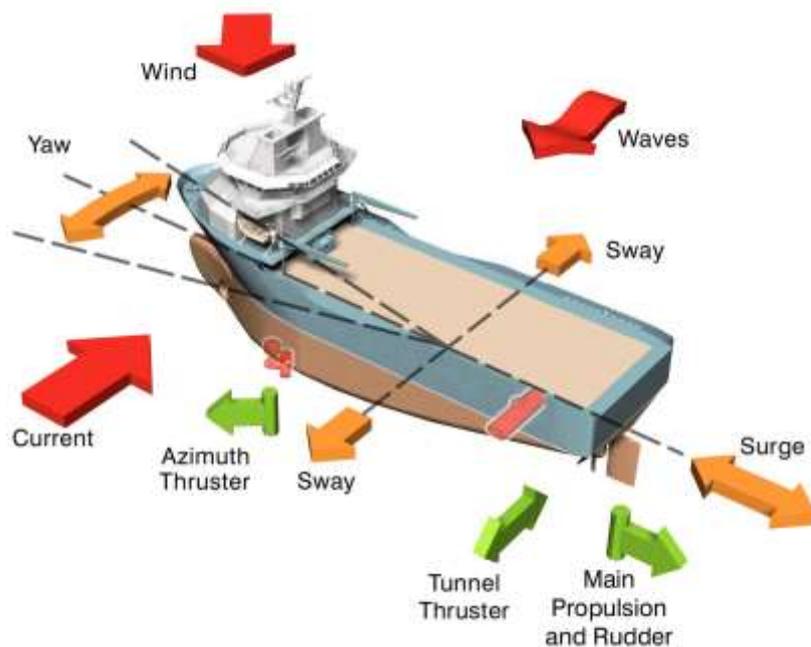


Ilustración 15. Fuerza y movimientos básicos. Fuente: www.km.kongsberg.com

Los tres primeros son denominados cabeceo (Pitch), balance (Roll), y guiñada de rumbo (Yaw), mientras que los tres de traslación, 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.

En la figura anterior (figura 15), podemos observar los siguientes movimientos básicos y las fuerzas a las que se somete un buque de navegación. Observamos por un lado las fuerzas (Viento, olas y corriente), y por otro los movimientos básicos (Guiñada, deriva y avance o retroceso).

En la figura que se muestra a continuación (Figura 16), podemos observar los tres grados de libertad restantes (Cabeceo, balance y arfada).

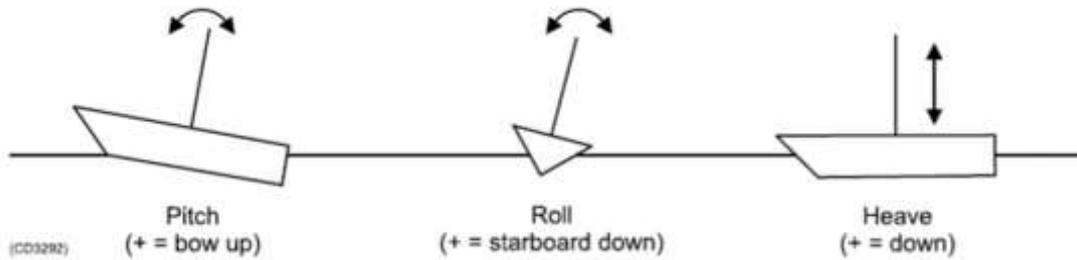


Ilustración 16. Pitch, roll and heave. Fuente: Manual Posicionamiento Dinámico (cPos)

Los movimientos de cabeceo y balanceo no son controlados por el sistema. Sin embargo, con el fin de permitir que el sistema de posición – referencia corrija estos movimientos, el sistema debe obtener información sobre ellos. Esta información es recibida a través de los sensores de referencia vertical, de los cuales dedicaremos una sección para exponer el tema de los sensores por los cuales recibe la información el ordenador a bordo del DP.

Este sistema de posicionamiento dinámico no controla ni requiere información sobre el movimiento de arfada, pero el movimiento se puede medir y mostrar en la pantalla de información.

4.1 PRINCIPIOS DEL SISTEMA

A continuación, se muestra un diagrama de bloques simplificado del sistema de DP (Ilustración 17), y se describe en las secciones que siguen.

4.1.1 EL FILTRO DE KALMAN

El Filtro de Kalman, considerado como el gran logro en la teoría de la estimación del siglo veinte, fue desarrollado por Rudolf Emil Kalman en 1960. Se trata de un algoritmo que nos permite la identificación del estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal, sometido a ruido blanco acústico. (Kalman 1960). En el estudio de “Localización de robots mediante Filtro de Kalman” (Ruiz 2010) lo define como “un filtro recursivo de predicción que se basa en el uso de técnicas de espacio de estado y los algoritmos recursivos.” El filtro realiza un seguimiento del estado estimado del sistema y la varianza o la incertidumbre de la estimación. La estimación se actualiza mediante un modelo de transición de estados y mediciones, que denotan la estimación del estado del sistema en un determinado instante.

El filtrado de Kalman, también conocido como estimación cuadrática lineal (LQE), utiliza una serie de mediciones observadas con el tiempo, que contiene ruido estadístico y otras inexactitudes, y produce estimaciones de variables desconocidas que tienden a ser más precisas que los basados solamente en una de las mediciones.

Podemos dividir el Filtro de Kalman en dos etapas; consta de una primera etapa de predicción seguida de una etapa de corrección aplicada al proceso, lo que permite no solo estimar sino filtrar de manera óptima la señal.

Si aplicamos el Filtro de Kalman a la navegación, permite estimar el rumbo, posición y velocidad del buque en cada uno de los tres grados de libertad – deriva, guiñada y avance o retroceso-. También incorpora algoritmos para estimar el efecto de las corrientes marinas y el oleaje.

El Filtro de Kalman utiliza un modelo de buque que incluye características hidrodinámicas tales como coeficientes de resistencia y datos de masa virtuales. Este modelo, llamado “Mathematical Vessel Model” (Modelo matemático de un buque),

describe cómo el buque responderá a una fuerza aplicada, como, por ejemplo, el viento y los propulsores. Este conocimiento, combinado con la información recibida a través de los sensores, permite al ordenador calcular el ángulo de la dirección requerida y la salida para cada propulsor. Esto permite operaciones en el mar, donde el amarre o anclaje no es factible debido a la profundidad excesiva de las aguas, la congestión en el fondo del mar (tuberías, plantillas) u otros problemas.

El modelo matemático no es una representación al 100% del buque real. La situación del buque y el rumbo se introducen en el sistema y se comparan con la predicción hecha por el modelo.

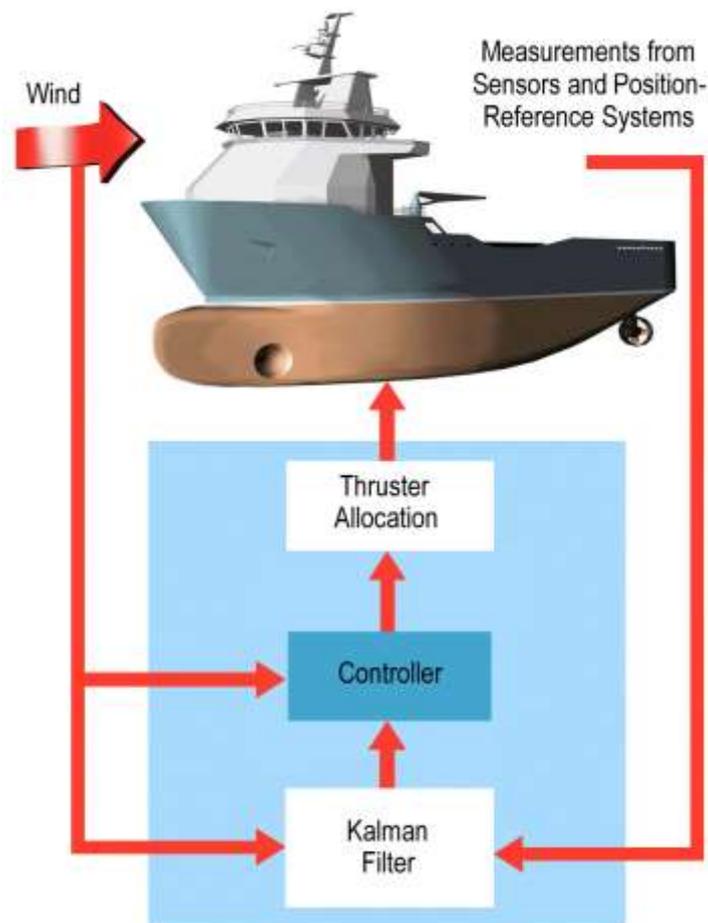


Ilustración 17. Diagrama del bloque del sistema DP. Fuente: Manual Posicionamiento Dinámico (cPos)

La base del funcionamiento de un sistema de posicionamiento dinámico es la aplicación informática realizada a través del modelo matemático del buque, que se encarga de controlar automáticamente la posición de un buque. Esto se realiza procesando toda la información que recibe a través de los sensores (viento, corriente, profundidad, referencia vertical, inercia, rumbo...).

Antes de activar el SPD (Sistema de Posicionamiento Dinámico) de un buque, la aplicación informática, posee la información necesaria como por ejemplo, el número de propulsores, sensores, energía necesaria...; para así poder asegurar el buen funcionamiento del sistema aun existiendo alguna anomalía. (Puesto que ya tendrá toda la información necesaria antes de empezar con las órdenes de contrarrestar las fuerzas) (Villar 2012)

Se define un **modelo matemático** como *“aquel sistema donde todos los comportamientos u opciones se pueden simular por medio de ecuaciones matemáticas cuyas variables están previamente establecidas de acuerdo a lo que se quiere contemplar.”* (Morales 2016) Estos modelos te permiten obtener resultados como resultado de experiencias anteriores o de estadística. Como todo, cualquier modelo matemático puede sufrir errores cuando se compara con la realidad, puesto que debemos tener en cuenta que no deja de ser un cálculo y factores externos que no permiten la exactitud.

Habiendo definido el modelo matemático, volvemos a los Filtros de Kalman: La situación del buque y el rumbo se introducen en el sistema y se comparan con la predicción hecha por el modelo. Esta diferencia se usa para actualizar el modelo mediante el uso de técnica de filtrado de Kalman. Por esta razón, el modelo también cuenta con el aporte de los sensores de viento y la retroalimentación de los propulsores. Este método permite incluso no tener entrada de cualquier PRS (Position Reference System) durante algún tiempo, dependiendo de la calidad del modelo y el clima. Este proceso se conoce como navegación a estima. (La navegación a estima es el proceso de cálculo de la propia posición actual mediante el uso de una

posición previamente determinada, y hacer avanzar esa posición basándose en las velocidades, conocido o estimado en el tiempo y transcurrido curso. Sin embargo, mediante el uso de la técnica de filtrado de Kalman, el modelo puede ser continuamente corregido.)

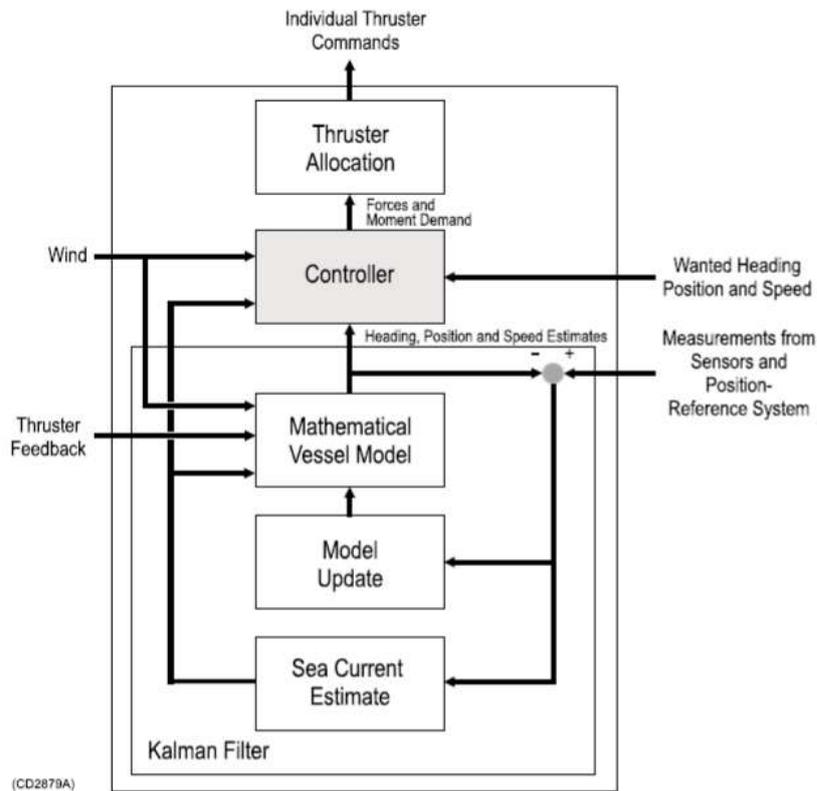


Ilustración 18. Diagrama Filtro de Kalman. Fuente: Manual Posicionamiento Dinámico (cPos)

El Filtro de Kalman proporciona:

Ventajas

Una combinación óptima de los datos de los diferentes sistemas de la posición de referencia. El sistema calcula una variación para cada sistema de posición de referencia en uso, y diferentes ponderaciones en sus medidas de acuerdo con el sistema individual de calidad.

En ausencia de medidas de posición, el modelo proporciona un modo "de estima". Como dijimos previamente, esto significa que el sistema es capaz de realizar el posicionamiento por algún tiempo sin actualizaciones de posición de cualquier sistema de posición de referencia.

En el Filtro de Kalman, la fiabilidad del modelo matemático del buque y el ruido nivel de la medida de posición son la base para decidir cuánto confía en cada medición. A medida que transcurre el tiempo la fiabilidad del modelo se incrementará a través de actualizaciones continuas de la respuesta del buque. Con el fin de estimar la posición del buque, el sistema de DP utiliza la información extraída de: Sistemas de posición de referencia (también referido como posición de medición del equipo), a través de, por ejemplo, DGPS, acústica... Mencionados anteriormente en el capítulo 2.

Cada Sistema de Posición de Referencia devuelve una posición medida de la embarcación. Una vez recibidas las señales, estas se convierten en un formato común y luego son validadas antes de ser utilizados por el Sistema de DP (Ya que los sistemas de referencia de posición están sujetos a fallos que pueden dar lugar erróneo de salida, un mecanismo de medición "validación" tiene que estar en su lugar. Estos fallos son lo que llamamos redundancia, explicado más adelante en el capítulo 5 (5.1: Niveles de Redundancia).

En la figura siguiente (Ilustración 19), podemos observar cómo llega la información de posición a través de distintos dispositivos, como podemos ver en este caso, a través del GPS Diferencial 1 y 2, y del sistema de posicionamiento acústico. Una vez entra la información a la señal para el pre-procesamiento, esta se convierte a un formato común, se convierte a una cifra numérica de coordenadas de posición, posteriormente corregida y validada a través de un "TEST".

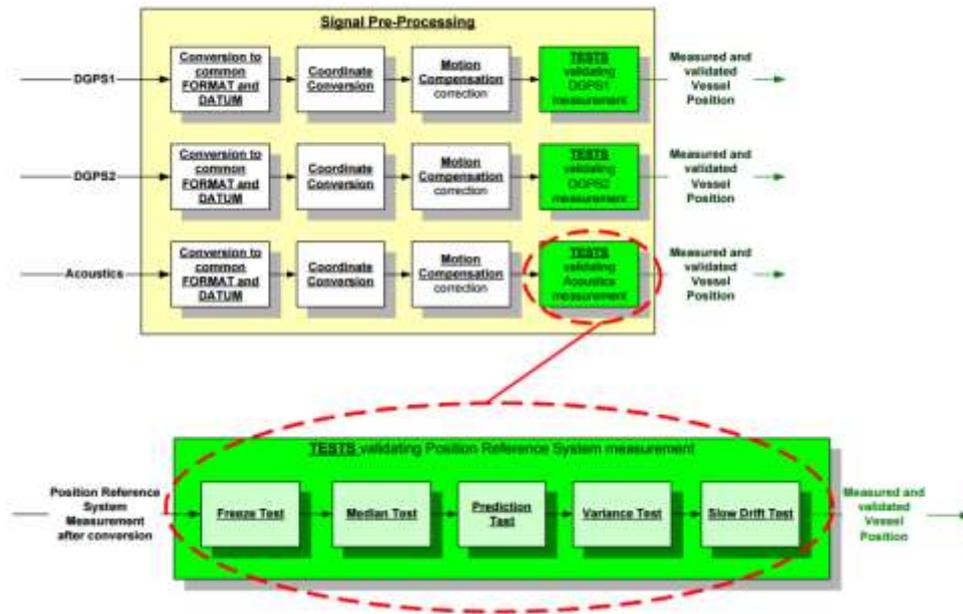


Ilustración 19. Típicas rutinas de sistema de posicionamiento de referencia pre-procesamiento. Fuente: <http://dynamic-positioning.com/>

Volvamos al objetivo principal del estudio del Filtro de Kalman: estimar el estado del buque.

Vamos a tomar posición como un ejemplo de uno de los estados del buque. Basado en el modelo de buque, y usando la estimación de la posición anterior del buque, el paso de predicción del Filtro de Kalman nos da una predicción de la posición del buque. Basado en las fuerzas que actúan sobre el buque, sobre el modelo del buque y en la estimación de la posición anterior, aquí es donde el sistema de DP piensa que el buque se encuentra.

Una medición entra de uno de los sistemas de referencia de posición. Esa medición será utilizada para refinar la predicción calculada previamente. El segundo paso, o el paso de corrección, compara la medición con la predicción de medición calculada por el sistema DP. Tiene que haber un mecanismo para dar menos "peso" a una medición inexacta y más "peso" a una medición con mayor exactitud (en comparación con el modelo): esto es lo que hace la ganancia de Kalman (calculada por el Filtro de Kalman). La predicción de la posición previamente calculada se corrige por un factor igual a la ganancia de Kalman multiplicada por la diferencia entre la posición estimada y la posición medida. Una vez realizado este proceso, este vuelve

a la etapa de predicción y comienza de nuevo. Un diagrama esquemático simplificado de un Filtro de Kalman para nuestra aplicación DP se da en la ilustración 20.

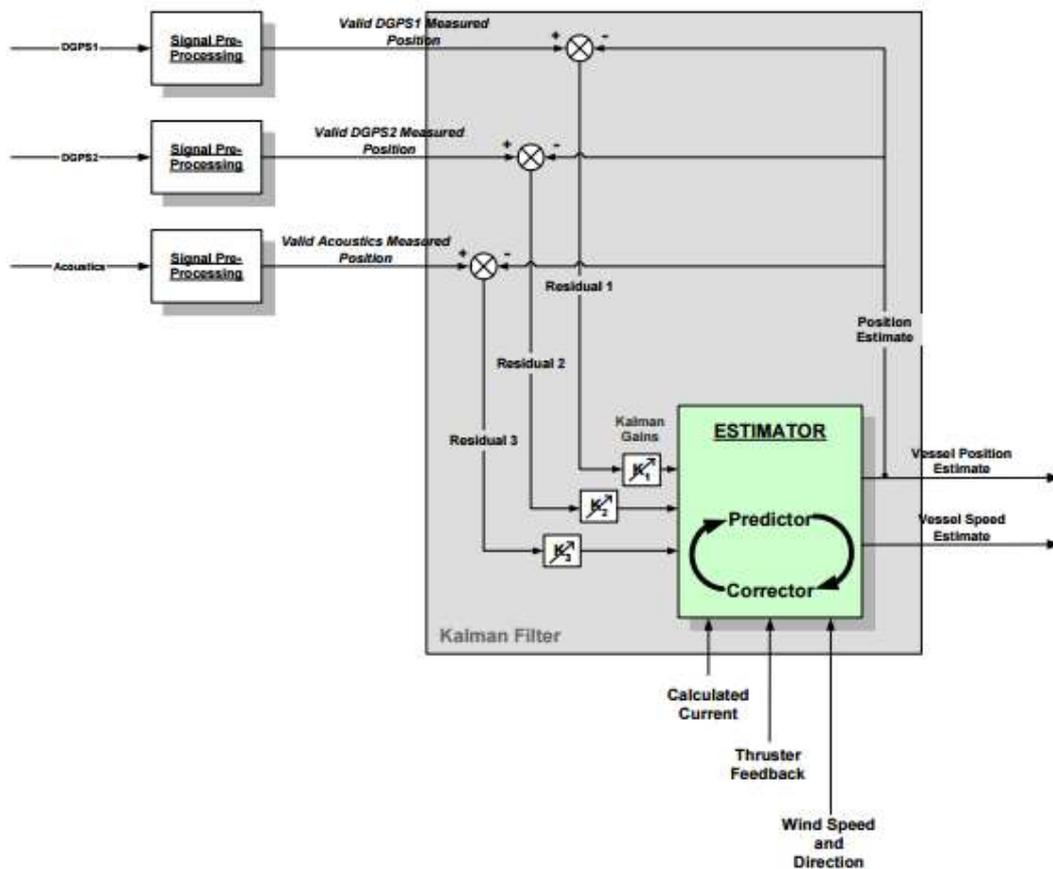


Ilustración 20. Esquema simplificado del Filtro de Kalman. Fuente: <http://dynamic-positioning.com/>

Debemos tener en cuenta que al igual que cualquier otra medición, en las mediciones de posición de referencia, los sistemas son ruidosos. La fuente de ruido depende de los sensores utilizados y del método utilizado para la posición de medición. Como resultado diferentes tipos de sistemas de referencia de posición tendrán diferentes características de ruido. DGPS y acústica son buenos ejemplos de sistemas de posición de referencia con diferentes velocidades de actualización y características de ruido.

El modelo también proporciona alguna información sobre el estado del buque. El modelo contiene una descripción hidrodinámica del buque. En otras palabras, el modelo se utiliza para describir la reacción del buque que se basa en las

fuerzas externas que actúan sobre él. El modelo del buque es un conjunto de ecuaciones de movimiento que se utilizan para predecir el movimiento del buque, cuando las fuerzas conocidas y el momento son aplicadas.

Ejemplificando, vamos a empezar con un caso extremo, en el cual no se recibe ninguna medición. En este caso (también conocido como navegación a estima) el Filtro de Kalman solamente se basa en el modelo de recipiente para estimar el estado del buque. Vamos a tomar posición en este caso para simplificar. En este punto, nos debemos preguntar qué pasará en esta posición, y si confiaríamos en la navegación de estima únicamente, puesto que con el paso del tiempo la estimación será cada vez menos exacta, simplemente porque el modelo de buque es sólo una aproximación del comportamiento real del mismo. Por lo tanto la incertidumbre de estimación aumentará con el tiempo en este caso en particular.

Ahora imaginemos que un sistema de referencia de posición es seleccionado y devuelve una medición válida de la posición del buque. El Filtro de Kalman le dará un mayor peso a esta nueva información para corregir lo que piensa que es una estimación muy aproximada (recordemos que la incertidumbre de estimación es alta como se ha descrito antes). Por lo tanto la ganancia de Kalman calculada será alta y el Filtro de Kalman presenta un alto peso a la residual. Esto tiene sentido y confirma el comportamiento de la ganancia de Kalman.

Como una manera de resumir todas las nociones introducidas anteriormente, podemos dar un diagrama claro de un Filtro de Kalman. (Ilustración 21)

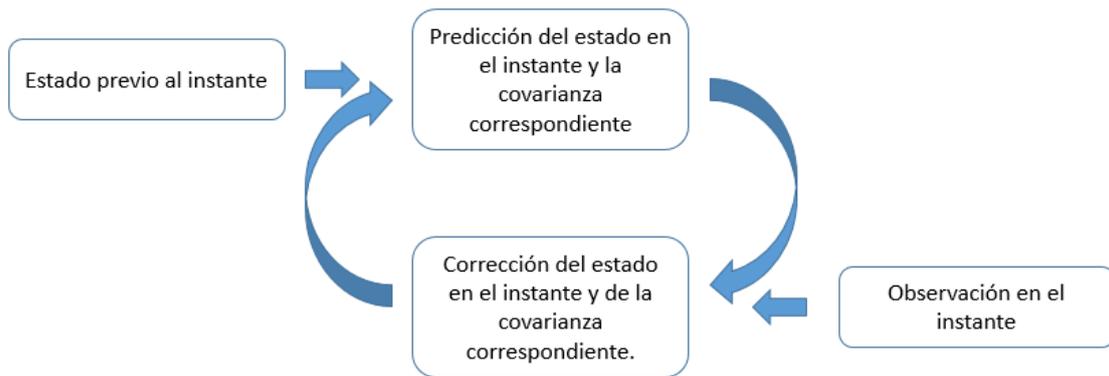


Ilustración 21. Circuito del Filtro de Kalman. Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 22, podemos observar cómo entra la información, donde podemos observar la diferencia de precisión entre la información recibida a través de un PRS, a través del modelo, y la posición verdadera. Cada vez que entra la información referente a la posición estimada, esta es corregida. La extensión de la corrección (Distancia entre las líneas discontinuas verticales), dependerá de la precisión de la posición estimada. A su vez, podemos observar en el gráfico la covarianza, que según la exactitud de la estimación de posición, variará (A mayor precisión, menor covarianza).

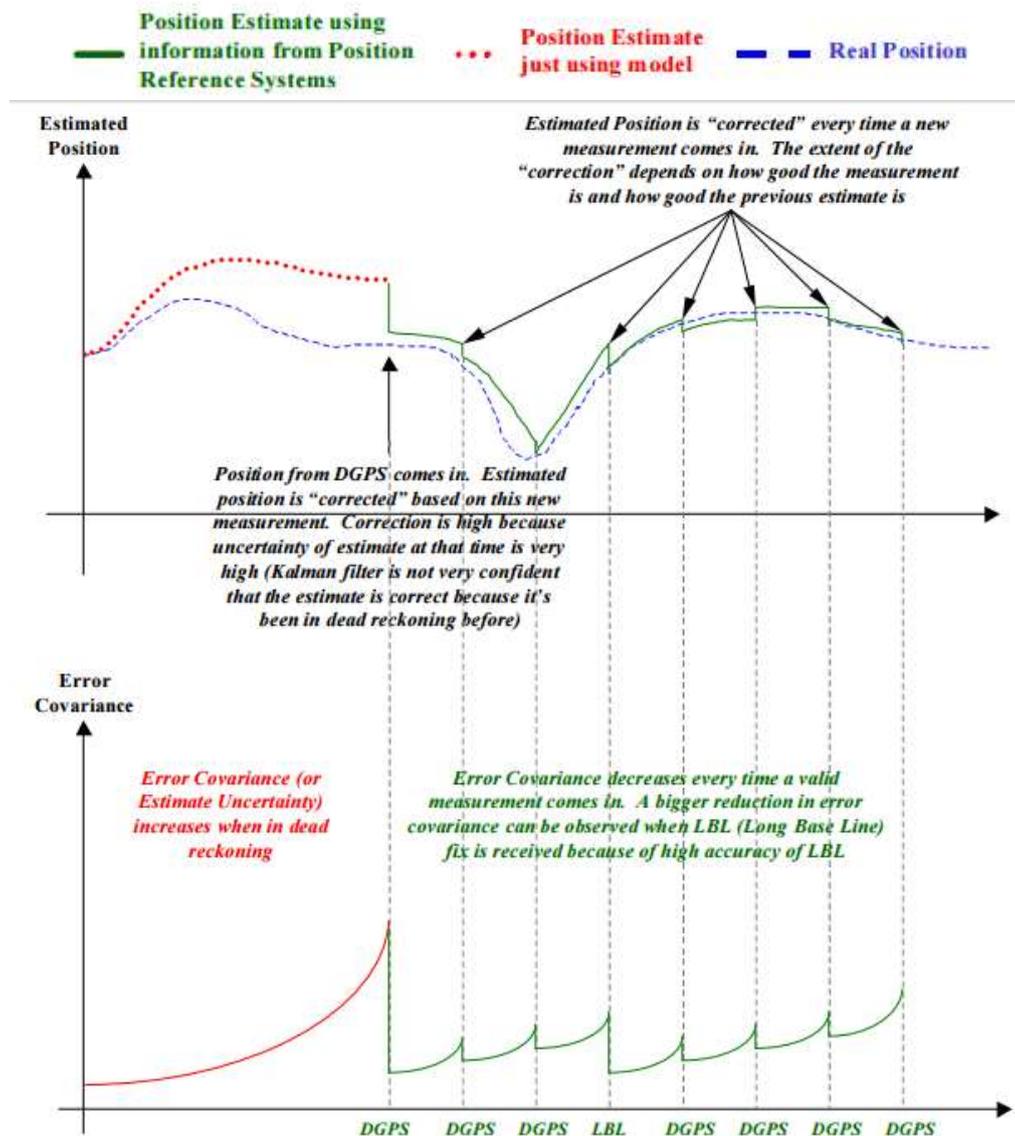


Ilustración 22. Evolución de la incertidumbre de la posición con el tiempo estimado. Fuente: <http://dynamic-positioning.com/>

La estimación del error existente entre la señales de entrada se calcula mediante el cálculo de la covarianza, definida en probabilidad y estadística como “la covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias. Es el dato básico para determinar si existe una dependencia entre ambas variables y además es el dato necesario para estimar otros parámetros básicos”. (Wikipedia 2016)

El algoritmo del Filtro de Kalman realiza un procesamiento de datos recursivos. Se trata de una herramienta de software que no requiere que todos los datos anteriores se mantengan en la memoria. Cuando hablamos de datos recursivos - con la recursión nos referimos a una forma de atajar y solventar problemas-.

Todos los datos anteriormente registrados, son de hecho capturados en la estimación más reciente del estado del sistema. Esta es una característica importante a la hora de implementar este tipo de algoritmo en los ordenadores.

También decir, que este tipo de filtro es óptimo, al calcular la mejor estimación posible (mínima varianza) para el estado del sistema.

5 EQUIPAMIENTO DE CLASES

La Organización Marítima Internacional (IMO) estableció cuatro niveles o clases de equipos DP: DPS-0, DPS-1, DPS-2 y DPS-3. La principal diferenciación existente entre las Clases son los niveles de redundancia y de Station Keeping Capability, los cuales describimos a continuación.

5.1 NIVELES DE REDUNDANCIA

Cuando nos encontramos en un buque, con el ordenador DP en funcionamiento, corremos el riesgo de que se provoque un fallo del sistema DP. En determinadas operaciones en las cuales pueden darse errores o un malfuncionamiento del sistema, nos encauzaría a la salida de la zona en la que queremos permanecer, o bien una pérdida total del control de la posición del buque. Estos se clasifican como “errores catastróficos”, puesto que la función del posicionamiento dinámico es mantener la posición con un rango no superior a 1m. Además, las consecuencias pueden ser aún más peligrosas, ya que estaría en juego nuestras vidas, con riesgo de herida o muerto, o bien riesgo de la propiedad, y, en consecuencia, posibles vertidos y contaminación del medio ambiente. Es por ello, que la redundancia tiene como objetivo el buen funcionamiento del sistema, aun perdiendo uno más elementos del sistema.

Los fallos pueden ser, entre otros:

- Fallo de propulsión.
- Del generador.
- De alimentación.
- Fallo en el ordenador de control.
- Fallo en el sistema de referencia de posición.
- Del sistema de referencia.

Cuando hablamos de la redundancia en la propulsión, el peor escenario con el que nos podemos encontrar (Worst-case single-point failure), sería en caso de la pérdida completa de una barra (Figura 23). En consecuencia a esto, nos fallarían todos los propulsores que se encuentren acoplados a dicha barra. Por ello, debemos distribuir la energía, de manera que si se diera el caso del peor escenario, el buque estuviese dispuesto de la suficiente potencia como para mantener la posición. Esto se podría hacer alimentando las distintas hélices de las que pueda estar capacitado un barco, de distintos cuadros, así, por ejemplo, si suponemos un barco con tres hélices a popa y otras tres a proa, en un supuesto caso de caída de cuadro, nos quedaríamos con dos hélices en proa y otras dos en popa, suficiente para salir del apuro.

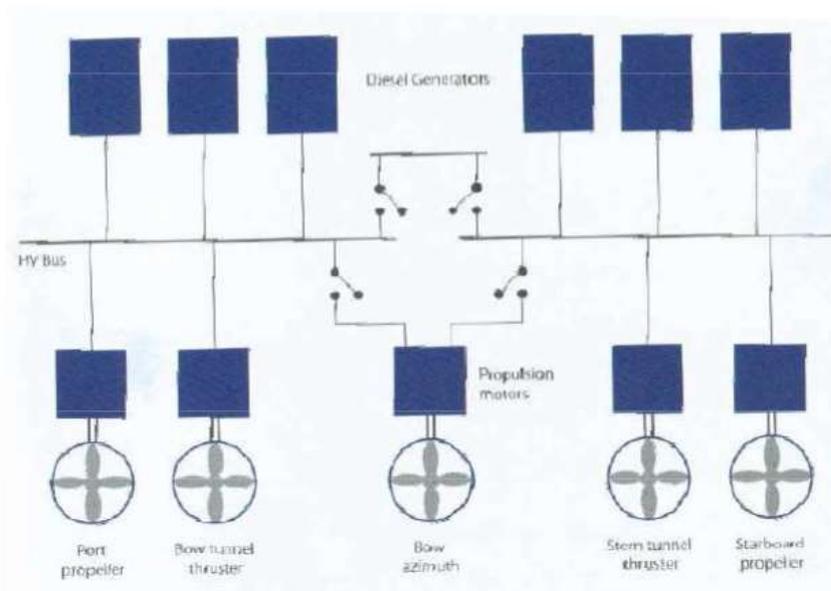


Ilustración 23. Redundancia en la propulsión. Fuente: <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1414/Jos%E9%20Manuel%20Villar.pdf?sequence=1>

Dicho esto, cuando hablamos de redundancia, la definimos en términos de posicionamiento dinámico, como la habilidad del buque para soportar la pérdida de cualquier componente individual sin perder la posición o el rumbo.

El objetivo de la redundancia es asegurar que el sistema en su conjunto funciona correctamente a pesar de perder un elemento individual o subsistema y así evitar los llamados “errores catastróficos”.

Para la elección de la Clase que debe ser utilizada en una determinada situación me he basado el criterio 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:** Operaciones en las que no se corre el peligro de la pérdida de vidas humanas ni de daños materiales si se diera el caso de la incapacidad para mantener la posición. En estas situaciones se recomiendan equipos DPS-1 o los denominados DPS-0.
- **Operaciones de clase 1:** Son operaciones 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:** Aquellas operaciones 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.

Concluimos entonces que:

- Un buque equipado con un DP1 no tendrá redundancia completa.
- Un buque con DP2 tendrá completa redundancia en equipos y sistemas.
- Un buque equipado con DP3 tendrá la capacidad de mantener rumbo y posición tras la pérdida de todos sus componentes.



Ilustración 24. Configuración Estándar. Fuente: www.moxa.com

Hay que destacar que un fallo aislado en DP3 puede implicar la pérdida de un compartimento completo. En esta figura 24, podemos observar a configuración estándar de un posicionamiento dinámico, donde podemos interpretar el fallo de alguno de los compuestos, como por ejemplo, una de los girocompases, un sensor de viento, el FanBeam (explicado previamente, un sistema de referencia de posicionamiento basado en un dispositivo laser)

La publicación de la IMO, MSC.645 “Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems” es la base o documento de bases para buques DP.

Se recomienda la utilización de las categorías de DP dependiendo de las actividades que se utilicen:

Application on DP	Minimum Recommended DP Equipment Class (See Note 1 below)
Drilling	2
Diving	2
Pipelay	2
Umbilical Lay	2
Lifting	2
Accommodation	2
Shuttle Offtake	2
ROV Support (Open Water)	1
ROV Support (Close Proximity - Surface/ Subsea)	2
Floating Production	2
Seismic and Survey vessels (Open water- outside 500 m zone)	**
Well Stim	2*
Logistics Operations	2*

Ilustración 25. DP Classes (Clases de Posicionamiento Dinámico según operaciones). Fuente: <http://dynamic-positioning.com/>

En esta figura observamos cómo, dependiendo de la función que el buque vaya a desempeñar, la IMO MSC.645 “Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems” recomienda una clase de equipamiento u otro.

Estas aplicaciones son:

- Perforaciones.
- Buceo.
- Tendidos de tuberías.
- Tendidos de cables eléctricos.
- Operaciones de elevación.
- ROV “Remote Operated Vehicle” (Vehículo operado a distancia).
- Producciones flotantes.
- Buques Oceanográficos.
- Operaciones de logística.

5.2 STATION KEEPING CAPABILITY

Como he explicado anteriormente, la función principal 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. 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.

Establecer el nivel de Station Keeping Capability de un buque, es una tarea complicada. Normalmente, la capacidad de permanencia de un buque en una posición determinada, es representada a través de un diagrama polar, en el cual el barco es sometido a diferentes situaciones de viento, oleaje y corriente y con diferentes combinaciones de propulsores.

A la hora de obtener un diagrama polar con la definitiva reacción del buque ante diversas situaciones, se deben calcular: el viento, el oleaje, la corriente, y la

eficiencia de los propulsores y timones. A todas estas posibles situaciones, habrá que aplicar distintas fuerzas que actúen desde diferentes direcciones a la vez.

Lo primero que se establece a la hora de realizar el diseño de las embarcaciones equipadas con sistemas DP, es el nivel de *Station Keeping Capability* deseado. Una vez establecido, se acuerda un determinado número y potencia de los propulsores para poder mantener el nivel elegido. Como dijimos anteriormente, se deben realizar varios experimentos variando el funcionamiento de los propulsores del buque, ajustando el abanico de posibilidades 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 Design Intent”.

Habiendo realizado las pruebas, una vez el buque se encuentra ya en servicio, a continuación se realizan las pruebas de Station Keeping Capability, pero esta vez, de manera real. Los resultados se representarán en el puente y deben de estar siempre a bordo para que en cualquier momento, se pueda disponer de ellas.

6. SISTEMA DP – B/O ÁNGELES ALVARIÑO

Durante mis prácticas, realicé un periodo de 4 meses en el Ángeles Alvariño, un buque oceanográfico operado por el IEO (Instituto Oceanográfico Español) y dotado de sistema de Posicionamiento Dinámico. A través del tiempo dedicado en enseñarme su funcionamiento por parte del Capitán y algunos oficiales, aprendí a manejar el control de posicionamiento dinámico. A simple vista, y desde el control, parece una tarea sencilla, puesto que siguiendo una serie de pasos, podemos posicionar el barco según nuestras necesidades.

En la ilustración que se muestra a continuación (Ilustración 26), podemos observar el control del posicionamiento dinámico del puente del B/O Ángeles Alvariño, en el cual podemos observar que consta de unos controles (botonera) y una pantalla, en la cual se presentan datos como el modo seleccionado (AUTO POS), ROT (Rate Of Turn), viento presente (Fuerza y dirección), corriente presente (Fuerza y dirección); hasta la posición actual del buque y la dirección a la que se está moviendo.



Ilustración 26. Control DP "B/O Ángeles Alvariño". Fuente: Elaboración Propia.

El procedimiento a seguir a la hora de activar el funcionamiento del sistema de posicionamiento dinámico, era el siguiente:

1. Comenzamos con la recepción de control, ya que el sistema se deshabilita (Standby) siempre que se deja de usar, en modo de prevención contra el posible funcionamiento automático del sistema.
2. A continuación, activamos el modo “Joystick”, lo que representa el control manual del equipo, y no el automático. También puede ser utilizado para el control aislado o para el control manual/automático combinado.
3. Activamos ahora el botón de Ref. Systems (PRS) junto con el GPS.
4. Finalmente, activamos el sensor. Este paso es en el cual le damos permiso al sistema para empezar a recibir toda la información procedente de los sensores.

Una vez realizados estos pasos, nos cerciorábamos de que el sistema entrase en funcionamiento, y vigilábamos continuamente que mantuviese la posición.

Activábamos el posicionamiento dinámico cuando hacíamos muestreos de agua, dragados de rocas (Recogida de muestras de roca del lecho marino), trabajos con el ROV (Remote Operated Vehicle), batimetrías, posicionamiento de boyas ODAS...

Por ejemplo, en los muestreos de agua, el equipo científico que iba a bordo del buque, tenía previstas las posiciones en las que querían hacer el muestreo, cuyas posiciones nos hacían saber previamente. Al llegar al lugar, ajustábamos la posición para lograr la mayor precisión posible, y con el DP, manteníamos el buque en situación. A continuación, la roseta con sus botellas vacías (Ilustración 27), se sumergía en el agua, y a raíz de ahí, los científicos decidían cuando cerrar las botellas según qué profundidades, donde posteriormente, examinarían el agua por motivos científicos. En cuanto al posicionamiento dinámico, dependiendo de las condiciones meteorológicas, el sistema de posicionamiento dinámico establecía la posición

deseada a una velocidad u otra, aproando el buque al viento o a la corriente, dependiendo de cuál de las dos fuerzas fuera la dominante. (Estas variaciones de rumbo podían ser modificadas por el DPO (Operador del posicionamiento dinámico) o modificadas por el propio sistema (Automáticamente)).



Ilustración 27. Roseta muestreo de agua. Fuente: Propia.

A continuación, en la ilustración 28, observamos unos de los momentos en los que fotografié el cambio de una boya ODAS. En estos trabajos, el posicionamiento dinámico es una herramienta imprescindible, puesto que no solo hay que dejar a

boya que sustituye a la anterior en el lugar exacto en el que estaba, sino que hay que acercarse de manera cautelosa, ya que tampoco se puede dañar la boya actual.

Un mal movimiento, efectos del oleaje, demasiada velocidad o infinidad de complicaciones, pueden desencadenar un gran problema, de ahí la indispensabilidad del DP.



Ilustración 28. Recogida de boya ODAS. Fuente: Propia.

10. CONCLUSIONES

El posicionamiento dinámico ha sido un avance imprescindible en el mundo marítimo para poder desempeñar operaciones específicas, tales como cableados submarinos, prospecciones petrolíferas, operaciones con ROV, operaciones de dragado... En definitiva, se emplea para desempeñar un gran abanico de operaciones, las cuales, sin posicionamiento dinámico no se podría haber hecho.

Dados los rápidos avances en cuanto al posicionamiento dinámico que se han realizado en un periodo corto de tiempo, hay que tener en cuenta que seguirá avanzando y desarrollando cada vez más, puesto que pienso que hay muchos aspectos que pueden mejorarse, como el ruido en la información recibida por los PRS, mejorar aún más la precisión en la posición si es que cabe la posibilidad.

Habiendo estudiado el posicionamiento dinámico más a fondo, he descubierto lo que para mí es el cerebro del DP, el Filtro de Kalman, donde se procesa toda la información que se recibe, y a continuación, tras la predicción de la posición, se realiza la corrección de esta.

Desconocía por completo la existencia de dicho filtro, y las capacidades que tiene. Este filtro es aplicable en distintos ámbitos, y por lo tanto, es un avance importantísimo para distintos medios.

BIBLIOGRAFÍA

- Ben C. Gerwick, Jr. *Construction of Marine and Offshore Structures*. 2007.
- BLANCO, SANTAMARÍA y. «Sistema de Posicionamiento Dinámico (SPD) y operaciones offshore. Incorporación de tecnologías avanzadas.» *Marina Civil*, 2011.
- GPS.gov. *GPS.gov*. 2016. <http://www.gps.gov/governance/excom/>.
- Kalman, R. E. «A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME.» *Journal of Basic Engineering Vol. 82*, 1960: 35-45.
- Morales, Sofia. *SIMULACIÓN DE PROCESOS*. 9 de Febrero de 2016. <http://sofiamorales11.wix.com/simulacion-blog#!MODELADO/cu6k/56b9686d0cf2fd311cdb8aa4> (último acceso: junio de 2016).
- Ruiz, Sergio Pereira. *Localización de robots mediante filtro de Kalman*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros - Universidad de Sevilla, 2010.
- SANTAMARÍA, Juan José USABIAGA. s.f. <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/14983>.
- Sarabia, Pablo Tomás Zamora. *POSICIONAMIENTO DINÁMICO: PRINCIPIOS, CARACTERÍSTICAS Y OPERACIONES*. Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014.
- Villar, Jose Manuel. *POSICIONAMIENTO DINÁMICO: PRINCIPIOS, CARACTERÍSTICAS Y OPERACIONES*. Santander: Universidad de Cantabria - UNICAN, 2012.
- Wikipedia. *Wikipedia*. 2016. <https://es.wikipedia.org/wiki/Covarianza>.

Otras fuentes bibliográficas consultadas:

- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11879/fichero/PFC+Sergio+Pereira+Ruiz%252F7++Filtro+de+Kalman>
- <http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2003>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter
- <http://www2.famaf.unc.edu.ar/institucional/biblioteca/trabajos/638/16945>
- [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/23EE29C2A5B1E771C12571CA004B3827/\\$file/k-pos-brochure.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/23EE29C2A5B1E771C12571CA004B3827/$file/k-pos-brochure.pdf?OpenElement)

- https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_positioning
- <https://en.wikipedia.org/wiki/>
- http://www.volvopenta.com/volvopenta/spain/es-our_company/press_releases/_layouts/CWP.Internet.VolvoCom/NewsItem.aspx
- <https://ingenieromarino.wordpress.com/2014/03/10/20-buques-cablers-y-sistema-de-posicionamientodpparaoffshore/>
- <http://repositorio.unican.es/>
- <http://www.slideshare.net/khnks/dp-presentation-2755758>
- Kalman Filtering – Theory and Practice Using MATLAB® , 2nd Edition, M. S. Grewal and A. P. Andrews, Wiley-Interscience Publication, 2001
- Digital and Kalman Filtering, 2nd Edition, S.M. Bozic
- <http://www.rovs.es/#!que-es-un-rov/coyg>
- A Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control, J.G. Balchen, N.A. Jenssen, S. Saelid, E. Mathisen, MODELING, IDENTIFICATION AND CONTROL, 1980, VOL. 1, No.3