SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

VERÓNICA ARANGO RIVERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2014

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

VERÓNICA ARANGO RIVERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
Rafael E. Vásquez
Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2014

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

_____

Firma
Nombre:
Jurado

_____

Firma
Nombre:
Jurado

Medellín, Julio 31 de 2014

“Todo parece imposible, hasta que se hace”
Nelson Mandela

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado está enmarcado dentro del Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, proyecto 1210-531-30550 (Convocatoria COLCIENCIAS No 531 de 2011), y se desarrolla con la financiación de la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL; el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS; la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, UNALMED; y la Universidad Pontificia Bolivariana, UPB.

Expreso mis agradecimientos a mi papá, quién ha sido un gran apoyo y guía durante este proceso, a mi mamá por su paciencia y comprensión, a Daniel Maya quién ha sido un apoyo incondicional y una fuente de motivación para continuar. En especial, quiero agradecerle a mi director de trabajo de grado, Rafael Esteban Vásquez por su gran acompañamiento y comprensión y a todos los profesores que me han acompañdo en este camino, cabe destacar a: Juan Alberto Ramírez, Norha Ligia Posada, Diego Andrés Flórez, Carlos Alejandro Zuluaga y Julio Correa.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 13

1. INTRODUCCIÓN A LOS ROV Y A LA EXPLORACIÓN *OFFSHORE* . 15

1.1. ¿Qué es un ROV? 15

1.2. Clasificación de los ROVs 16

1.3. Exploración *offshore* y operación de los ROVs 18

1.3.1. Exploración *offshore* 18

1.3.2. Los ROVs en la industria petrolífera 19

1.3.3. Operación de los ROVs 20

1.4. Investigaciones sobre los ROVs en América Latina 24

2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO (DPS) 27

2.1. ¿Qué es un DPS? 27

2.2. Clasificación de los DPS 28

2.2.1. Clasificación de los DPS establecida por la IMO 28

2.2.2. Clasificación de los DPS establecida por la ABS 29

2.3. Componentes de un DPS 31

2.3.1. Sistema de potencia 32

2.3.2. Sistema de propulsores 32
2.3.3. Sistema de control del DPS 33
2.3.4. Sistema de referencia de posición 35
2.3.5. Sensores 37
2.4. DPS para la operación de ROVs 38
3. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO 43
3.1. Navegación estimada y navegación inercial 44
3.1.1. Navegación estimada 44
3.1.2. Sistemas de Navegación Inercial (INS) 47
3.2. Navegación geofísica 48
3.3. Navegación acústica 49
3.3.1. Long baseline (LBL) 52
3.3.2. Short baseline (SBL) 54
3.3.3. Ultrashort baseline 55
4. ALTERNATIVAS COMERCIALES 57
4.1. Tabla de alternativas comerciales para sistemas USBL 59
4.2. Páginas Amarillas 62
5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA UN ROV 66
CONCLUSIONES 70
BIBLIOGRAFÍA 70
ANEXOS 80

A. ARTÍCULO PUBLICABLE 81

B. ANTEPROYECTO 90

C. TABLAS DE PRODUCTOS Y FABRICANTES 121

D. MATRIZ DE DECISIÓN 122

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1 Componentes básicos de un sistema ROV 16

2 Clasificación de los vehículos subacuáticos 18

3 Instalación para la operación de un ROV en un bote pequeño 21

4 Espacios disponibles para la operación de un ROV desde un bote pequeño 21

5 ROV de exploración marina, perteneciente al buque *Okeanos Explorer* . . . 22

6 Trineo depresor del ROV perteneciente al buque *Okeanos Explorer* 22

7 DPS-0 29

8 DPS-1 30

9 DPS-2 31

10 Componentes básicos de un DPS 32

11 Principio de triangulación satelital 36

12 Movimientos de traslación y rotación de un ROV con 6 grados de libertad 39

13 Desplazamientos automáticos realizados por StationKeep^{TM} 40

14 Arquitectura de control del SeeTrack Offshore 40

15 Arquitectura de control del DPS presentado por Dunkan et al. 41

16 Posicionamiento de un cuerpo respecto a una posición conocida 44

17 Emisores de señales de radio de un DVL 45

18 Representación de un DVL en “Bloqueo de fondo” 47

19 Diagrama de bloques del sistema de posicionamiento inercial 48

20 Esquema de cálculo del desplazamiento horizontal del ROV 51

21 Principio de triangulación en sistemas de posicionamiento acústico subacuático 52

22 Proceso de posicionamiento en un sistema LBL 54

23 Configuración de un sistema de posicionamiento SBL 55

24 Configuración de un sistema de posicionamiento USBL 56

LISTA DE TABLAS

Pág.

1 Notaciones empleadas para la clasificación de los DPS 28

2 Sistemas de posicionamiento acústico 52

RESUMEN

En este trabajo de grado, se hace un estudio de los vehículos operados remotamente ROV, de los sistemas de posicionamiento dinámico DPS y de los diferentes sistemas de posicionamiento subacuático usados para la navegación de los ROVs. Con el fin de realizar un proceso de selección de un sistema de posicionamiento de manera objetiva, definiendo criterios de selección claros. Bajo los cuales se hace una evaluación de alternativas comerciales mediante una matriz de decisión. Como resultado de la matriz de decisión, se selecciona un sistema de posicionamiento acústico USBL, desarrollado por la empresa ORE Offshore EdgeTech, el cual cumple con las características necesarias para la operación de un ROV desde cualquier tipo de embarcación implementada como sede de control.

PALABRAS CLAVE:

Vehículo subacuático operado remotamente, sistema de posicionamiento, embarcación, posición, posicionamiento, navegación.

INTRODUCCIÓN

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana, se encuentra desarrollando actualmente el diseño de un vehículo subacuático operado remotamente (*Remotely Operated Vehicle*, ROV) que será empleado en la industria colombiana de petróleos para apoyar labores de exploración de los fondos marinos colombianos.

Al realizar exploraciones submarinas, el trabajo humano usualmente no supera los 180 m de profundidad, es por esto que cuando se requiere estudiar grandes profundidades es muy útil el uso de vehículos subacuáticos no tripulados [1]. El ROV que se está diseñando en el Grupo A+D, tiene como requerimiento básico alcanzar una profundidad operacional de 500 m. Para esto es necesario tener un cable umbilical que puede tener hasta 1 km de longitud. El cable es de gran importancia, debido a que éste es el medio de comunicación entre la superficie y el ROV, es decir, es el que permite enviar órdenes y recibir señales en la estación de control, y su necesidad está basada en la imposibilidad de transmisión de ondas electromagnéticas a través del agua.

Debido a las grandes profundidades a las cuales estará sometido el ROV y la gran longitud del cable, es necesario implementar un sistema de posicionamiento dinámico (DPS, por sus siglas en inglés) dentro del cual se pueda determinar la ubicación exacta del ROV respecto al barco, con el fin de lograr una operación conjunta de movimiento, entre el barco y el vehículo sumergible.

En la actualidad existe una gran variedad de sistemas de posicionamiento dinámico para ROVs. Con el fin de determinar cuál es el sistema de posicionamiento del ROV más apropiado para ser utilizado dentro del DPS, es necesario realizar un estudio de los sistemas de posicionamiento disponibles actualmente. Esto permitirá adquirir los fundamentos apropiados y establecer los criterios de selección necesarios para la adquisición del sistema de posicionamiento requerido en el DPS. Este sistema de posicionamiento es fundamental para la operación del ROV desde el barco, donde se encuentra la estación de control, y ayudará a evitar posibles fallas en el ROV, en el cable umbilical o inclusive

la pérdida del vehículo bajo el mar.

El objetivo principal de este proyecto, es la selección del sistema de ubicación de un ROV para establecer continuamente la posición actual del vehículo cuando se encuentre en operación. Para lograrlo es necesario hacer un estudio de los ROVs, de los DPS, de los sitemas de posicionamiento y realizar el proceso de selección bajo los criterios de selección definidos en función de los requerimientos de operación del ROV.

Este trabajo se divide en 5 capítulos. En el capítulo 1, se presenta una introducción a los vehículos operados remotamente, al proceso de exploración *offshore* y se hace referencia a estudios, realizados por entidades y universidades latinoamericanas, cuyo tema de investigación son los ROVs. En el capítulo 2, se describen los sistemas de posicionamiento dinámico de forma general y finalmente se describen algunos DPSs desarrollados para la operación de ROVs. En el capítulo 3, se describen los diferentes sistemas de posicionamiento y su principio de operación. En el capítulo 4, se hace un análisis de los diferentes sistemas de posicionamiento y se presenta la información obtenida de las alternativas comerciales y de los proveedores de sistemas de posicionamiento acústico USBL. En el capítulo 5, se describen los criterios de selección y se presenta la matriz de decisión, mediante la cual se seleccionó el sistema de posicionamiento.

1. INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE (ROV) Y A LA EXPLORACIÓN *OFFSHORE*

1.1. ¿QUÉ ES UN ROV?

Los vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV, *Remotely Operated Vehicles*) pertenecen, como su nombre lo indica, a la gran familia de los vehículos subacuáticos. Estos se dividen en dos grandes categorías, los vehículos subacuáticos tripulados y los vehículos subacuáticos no tripulados (UUV, *Unmanned Underwater Vehicles*), estos últimos están definidos por el US Navy's UUV Master Plan como: *"Sumergible autopropulsado cuya operación es completamente autónoma (con misión de adaptación preprogramada o controlada en tiempo real) o con mínima supervisión de control y no está atado por medio de cables, a excepción, posiblemente, de enlaces de datos tales como cables de fibra óptica"* [2].

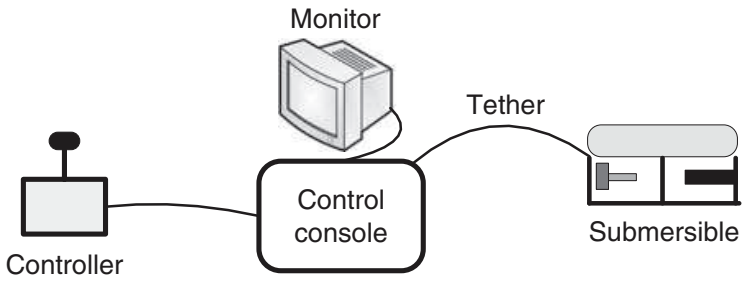
Según el Manual del ROV [2], la definición establecida por la US Navy, no es una definición estándar en la industria, puesto que considera los UUVs como sinónimo de los vehículos subacuáticos autónomos, pese a que los UUVs se dividen en dos grupos, los vehículos subacuáticos autónomos (AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*) y los vehículos operados remotamente (ROV). La principal diferencia entre los ROV y los AUV, es la presencia o ausencia de un cable que permite comunicación directa entre el vehículo y la superficie [2]. Los ROV están operados directamente desde la plataforma de control, desde allí se envían órdenes y se reciben señales por medio de un cable umbilical [3], mientras que los AUV tienen comunicación directa con la superficie por medio de señales de radio frecuencia o a través de un módem acústico [2].

La norma NORSOK U-102 [4] establece que el término ROV es comúnmente usado para referirse a los ROV, los AUV, los UUV o cualquier sistema con características similares, donde, un ROV es un equipo usado en el agua con la habilidad de observar sus alrede-

dores y posicionarse de forma remota con la superficie a través de un cable, mientras que los AUV tienen la habilidad de posicionarse dentro del agua sin interferencia desde la superficie.

Un ROV es entonces, un robot subacuático no tripulado, comunicado por medio de un cable a la superficie y cumple diversas tareas que pueden ser riesgosas para el ser humano. El sistema de un ROV está conformado por un vehículo subacuático conectado por medio de un cable umbilical a la superficie donde se encuentra la plataforma de control y los operadores, un sistema de manipulación para controlar la dinámica del cable, un sistema de lanzamiento y el suministro de potencia [5]. En la Figura 1 se ilustran los componentes básicos de un ROV.

Figura 1. Componentes básicos de un sistema ROV [2].



1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROVS

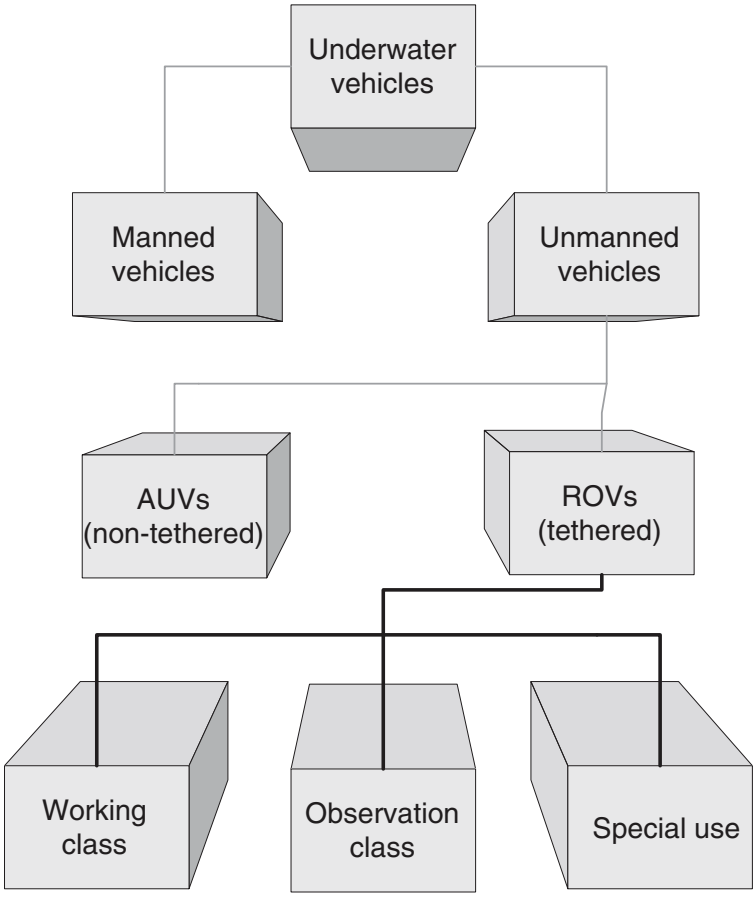
En el Manual del ROV [1] los vehículos subacuáticos se clasifican según se muestra en la Figura 2. Sin embargo, en la norma NORSOK U-102 [4], los ROVs se dividen en 3 clases diferentes.

- **Clase I⟶ Observación pura**
  Los ROVs Clase I están limitados físicamente a video observación. Generalmente son vehículos pequeños equipados con video cámara, luces y propulsores. Estos vehículos no pueden llevar acabo una tarea adicional sin modificaciones considerables.
- **Clase II⟶ Observación con opción de carga útil**

- **Clase II A - Vehículos de observación con opción de carga útil**
  Son vehículos con capacidad de cargar sensores adicionales tales como: cámaras con visión a color, protección catódica, sistemas de medición, cámaras adicionales y sonares. Los vehículos Clase II A deben ser capaces de operar sin perder su función principal y cargar al menos dos sensores adicionales.
- **Clase II B - Vehículos de observación con intervención ligera, con capacidad para inspección y construcción**
  Son vehículos con capacidad de cargar sensores adicionales tales como: cámaras con visión a color, protección catódica, sistemas de medición, cámaras adicionales y sonares. Los vehículos Clase II B deben ser capaces de operar sin perder su función principal y cargar al menos dos sensores adicionales. También tienen la capacidad de cargar manipuladores de trabajo ligeros y kits de herramientas. El vehículo es capaz de realizar tareas de inspección, intervención y construcción ligera.

- **Clase III$\longrightarrow$ Vehículos de trabajo**
  Son vehículos lo suficientemente grandes como para cargar sensores adicionales o herramientas a través de marcos de elevación y grandes manipuladores. Los vehículos Clase III tienen la capacidad de multiplexación, la cual permite que los sensores y las herramientas adicionales puedan operar sin ser cableados a través del sistema umbilical.
  - **Clase III A - Vehículos de trabajo $<$ 100 kW**
    Un ROV compacto con capacidad de elevación hasta 2000 kg y con capacidad de carga útil hasta 200 kg.
  - **Clase III B - Vehículos de trabajo $>$ 100 kW**
    Un ROV grande, con capacidad de elevación mayor a 2000 kg y con capacidad de carga útil mayor a 200 kg.

Figura 2. Clasificación de los vehículos subacuáticos [2].



1.3. EXPLORACIÓN *OFFSHORE* Y OPERACIÓN DE LOS ROVS

1.3.1. Exploración offshore

Colombia es el tercer país productor de crudo en América del Sur, después de Venezuela y Brasil, está a punto de alcanzar una producción promedio de un millón de barriles de crudo por día y se proyecta para el 2020 alcanzar una producción de 1.5 millones de barriles de crudo por día; sin embargo, es necesario aumentar las reservas petroleras del país, de lo contrario, llegar a la meta no sería posible. Actualmente se estima que Colombia cuenta con 23 bases potenciales de hidrocarburos, donde 7 de ellas son costa afuera, lo que conlleva al país a incentivar la exploración *offshore* (costa afuera) [6].

El proceso de exploración *offshore*, consiste inicialmente en identificar las zonas donde

hay presencia de rocas con hidrocarburos y posiblemente bases sedimentarias, esto se logra mediante un estudio batimétrico que permite conocer la topografía del fondo marino [7, 8, 9]. Para obtener información más detallada se procede a realizar una serie de evaluaciones geográficas de campo, empleando métodos de medición indirectos que buscan tipos de formaciones geológicas propensas a contener petróleo, algunos métodos implementados son la magnetometría, la gravimetría y los estudios geoquímicos. Si al analizar la información obtenida se establece que existe la posibilidad de hallar hidrocarburos se procede con la exploración sísmica, éste es uno de los pasos más importantes en la fase de exploración, porque permite conocer con mayor exactitud la presencia de trampas (mantos de roca sedimentaria sellados por rocas impermeables que evitan el paso del petróleo hacia la superficie) en el subsuelo [10], por lo tanto, se obtiene como resultado un esquema que muestra la distribución de las rocas en el subsuelo marino.

Con la información recopilada a través de los diversos estudios realizados en la fase de exploración descrita, se establecen las áreas que pueden contener mantos de rocas con depósitos de hidrocarburos, cuál es su potencial y dónde se pueden perforar los pozos exploratorios para confirmarlo [10, 11, 12]. Es a partir de allí que se comienza con la etapa de perforación exploratoria, con la cual se determina con exactitud la presencia de petróleo. La perforación en el subsuelo marino es realizada desde enormes plataformas ancladas o flotantes que se mantienen en un mismo lugar, son grandes estructuras que cuentan con los elementos y equipos necesarios para el trabajo petrolero. La actividad exploratoria es considerada una inversión de alto riesgo, ya que los resultados no son siempre positivos y requiere de una alta inversión económica, siendo mayor cuando se trata de exploración *offshore*.

1.3.2. Los ROVs en la industria petrolífera

La industria petrolífera se ha ido expandiendo hacia zonas marítimas en busca de prospectos petrolíferos. Esto se debe al avance tecnológico evidenciado en las herramientas y estructuras destinadas para la exploración y explotación *offshore* [6]. Los ROVs son parte del avance tecnológico, siendo unas de las herramientas más útiles dentro del campo de exploración y explotación *offshore*. Las principales aplicaciones de los ROVs dentro de éste campo son [13]:

- Garantizar la seguridad del buzo en una misión exploratoria y asistirlo en tareas

complejas.

- Realizar inspección visual de las plataformas petroleras, verificar la correcta instalación, monitorear el efecto de la corrosión y localizar grietas. Tareas que se logran con el uso de diversos dispositivos adicionales a cámaras de video.
- Estimar la contaminación biológica, tomar muestras de agua y de suelo, localizar objetivos en el fondo del mar, entre otras pruebas de medición y muestreo.
- Seguir ductos subacuáticos de transporte de hidrocarburos, revisar la presencia de fugas, verificar el estado de los ductos y asegurar la correcta instalación de estos.
- Realizar estudios acústicos y visuales necesarios para realizar instalaciones *offshore*.

En general, dependiendo de la capacidad, las herramientas, los sensores y la configuración de los ROVs, se determinan las tareas que pueden realizar en misiones exploratorias. Sin embargo, estos también pueden ser diseñados en función de la necesidad, ya sea para realizar trabajos de construcción, de operación, de inspección, de mantenimiento, de reparación, de muestreo, de observación, etc., dentro de instalaciones e investigaciones subacuáticas. Por lo tanto los ROV y su versatilidad representan una herramienta muy útil en todas las etapas de exploración o explotación *offshore*.

1.3.3. Operación de los ROVs

La operación y el mantenimiento de los ROVs requiere de instalaciones de alto nivel y un equipo de trabajo con experiencia, habilidad y conocimiento en el tema [14]. Sin embargo, la complejidad y el costo de las operaciones y del mantenimiento dependen de la misión, del tamaño del ROV y del transporte marítimo disponible para la operación y el control del mismo [14, 15].

Csepp [15] plantea una solución para disminuir los costos y aumentar la versatilidad en la operación de los ROVs. La solución consiste en operar un ROV con un equipo de trabajo de 2 a 3 personas en un bote de 5 m a 7 m de longitud. El artículo, describe los aspectos principales del proceso de instalación y operación que se llevó a cabo para manipular el ROV bajo las condiciones mencionadas, en las Figuras 4 y 3 se muestra la instalación de los equipos en un pequeño bote. Los criterios a tener en cuenta para la instalación y operación del ROV a bajo costo son las características físicas de las instalaciones, que deben ser lo más pequeñas posibles y deben estar completamente protegidas contra la humedad.

Figura 3. Instalación para la operación de un ROV en un bote pequeño [15]

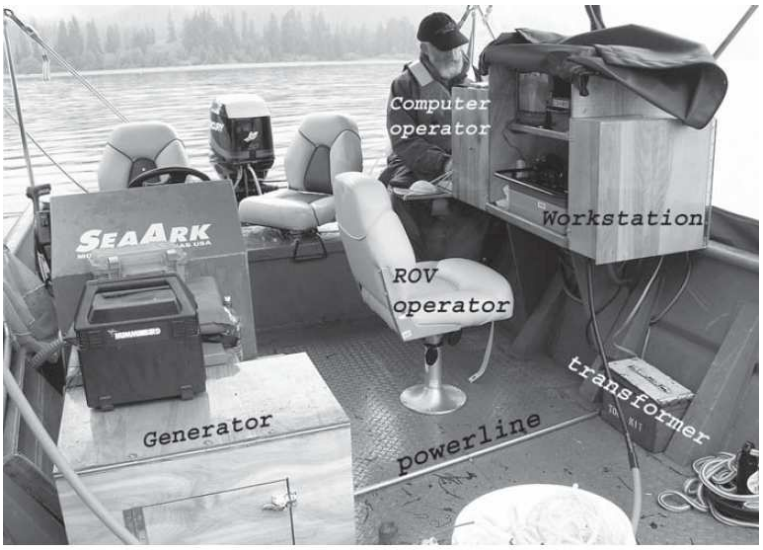
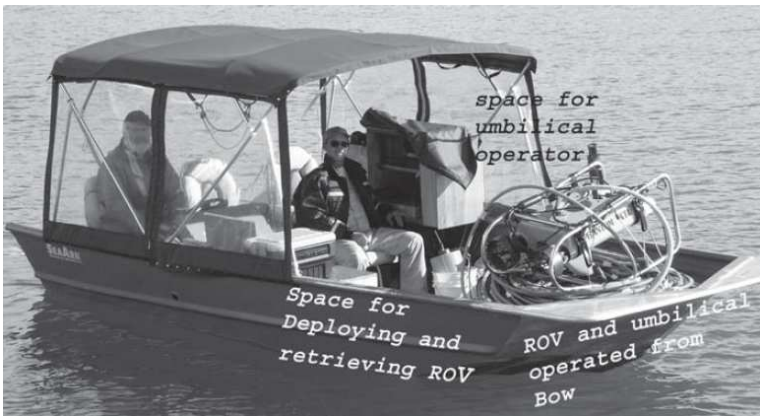


Figura 4. Espacios disponibles para la operación de un ROV desde un bote pequeño [15]



La limitación de esta solución es el tamaño del ROV, el cual, no debe superar 100 kg de peso (sin tener en cuenta el cable umbilical) y además, no es recomendable la operación bajo condiciones ambientales que no puedan ser soportadas por el bote o el ROV [15].

Para la operación, control y mantenimiento de ROVs de gran tamaño y capacidad, es necesario contar con instalaciones más complejas. Manley [16] describe las mejoras realizadas al buque de exploración marina, *Okeanos Explorer*, incluyendo todo el desarrollo e integración de las nuevas tecnologías necesarias para portar un ROV, cuya característica principal es su diseño de dos cuerpos conectados por medio de un cable flexible

con flotación neutra. En la Figura 5 y en la Figura 6 se muestran el ROV del buque y el cuerpo adicional, que es un trineo depresor con luces y cámaras independientes diseñado para optimizar la calidad del video.

Figura 5. ROV de exploración marina, perteneciente al buque *Okeanos Explorer* [16].

Figura 6. Trineo depresor del ROV perteneciente al buque *Okeanos Explorer* [16].

Para garantizar la seguridad y la correcta operación del ROV (Figuras 5 y 6) se hizo necesario realizar cambios significativos en los espacios del buque. Se contruyó un hangar especial para acomodar el ROV, se instaló un sistema de tracción y un carro

con actuación hidráulica para mover el ROV dentro y fuera del hangar. Adicionalmente se adecuaron dos habitaciones especiales para las necesidades del ROV. En una de ellas se instalaron todos los dispositivos eléctricos y electrónicos, los servidores y los demás equipos necesarios. La otra habitación se destinó para el centro de control del ROV, donde se encuentran los puestos de operación y las pantallas de visualización.

Si bien se presentan dos casos extremos, estos dan una idea de las instalaciones básicas necesarias para portar y operar un ROV desde cualquier tipo de transporte marítimo. A continuación se describen algunas características que se deben tener en cuenta para la operación del vehículo subacuático.

- La estación de control debe mantener una posición fija, ya sea mediante un sistema de posicionamiento dinámico (DPS, por sus siglas en inglés) o mediante un sistema de amarre (PM, por sus siglas en inglés).
- Es necesario conocer en todo momento las condiciones climáticas, la posición de la embarcación o estación de control, la posición del ROV con respecto ésta, la velocidad del ROV y del barco (en caso de existir fluctuaciones), entre otras variables que pueden afectar la seguridad de la operación o del ROV.
- Es importante tener en cuenta que cuando la estación de control no está protegida contra el ambiente exterior, todos los dispositivos de control y manteniemiento deben soportar la humedad y los cambios climáticos.
- Toda instalación diseñada para la operación de un ROV debe contar con una fuente de energía principal y otra de seguridad, para mantener todos los dispositivos en funcionamiento y para transmitir la energía necesaria para el funcionamiento del ROV, incluso bajo condiciones climáticas extremas.
- El sistema de manejo de cable y de lanzamiento y recuperación depende principalmente del tamaño y la complejidad del ROV.
- Para la comodidad del operador es importante contar con un espacio ergonómico y confortable, con el fin de evitar el agotamiento durante largos períodos de operación.

En el Manual del ROV [17] se describen las operaciones básicas necesarias para operar el ROV, además de todos los cuidados que se deben tener antes, durante y después de realizar la misión de exploración. En el Capítulo 8 del Manual del ROV [14], se hace enfásis en las revisiones previas a la operación, a la importancia del trabajo en conjunto de todo el personal involucrado, a la forma en que debe ser manipulado el cable

umbilical en función de su longitud y la misión de exploración. Además, se especifican los cuidados que se deben tener cuando se realizan tareas con presencia de buzos y cuando hay condiciones de temperatura extremas.

1.4. INVESTIGACIONES SOBRE LOS ROVS EN AMÉRICA LATINA

En América Latina, la industria petrolífera está incentivando la investigación y el desarrollo de herramientas para exploración subacuática. En países como México, Brasil, Perú, Venezuela y Colombia se han realizado proyectos de investigación enfocados al desarrollo de ROVs, con el fin de generar conocimiento y tecnología local.

En México, el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) ha trabajo en dos proyectos que abarcan el diseño y la construcción de ROVs para la industria de energía y petróleo. Uno de los proyectos es enfocado a aguas poco profundas, y el otro para aguas profundas. La aplicación principal de estos vehículos subacuáticos es la inspección visual de estructuras petrolíferas, de sistemas de producción de petroléo y de oleóductos subacuáticos en plantas de explotación *offshore* [18].

En el 2010, el CIDESI completó en un 85% la construcción del ROV para aguas poco profundas, llamado *Kaxan*, el cual fue diseñado para navegar a una profundidad máxima de 120 m y está equipado con una cámara y un manipulador eléctrico, para recolección de muestras. El otro ROV, para aguas profundas, es financiado por PEMEX, empresa mexicana de hidrocarburos. En el 2010, la fase de diseño ya había concluido y estaba a la espera de iniciar su construcción. El ROV está diseñado para alcanzar una profundidad máxima de 2000 m y cuenta con 3 cámaras, un manipulador hidráulico de 5 funciones, diversos sensores, un sistema de lazamiento y recuperación y un sistema de manejo de cable [18].

En Brasil, se han realizado diversas investigaciones en el tema de robótica submarina. En 1995, Wollmann et al. [19] describieron un método experimental empleado para identificar los parámetros de un modelo simplificado de propulsores, encargados de impulsar un ROV llamado *Tatui*, el método fué empleado para el desarrollo de un sistema de posicionamiento instalado en el ROV. En 2005, Pinheiro [20] presentó un

método para desarrollar modelos dinámicos de ROVs con arquitectura de marco abierto (*open frame*) y planos simétricos (*symetrical planes*). En 2011, Avila et al. [21, 22, 23] presentaron los resultados experimentales obtenidos al comparar dos metodologías para determinar los coeficientes hidrodinámicos de un ROV, las metodologías comparadas son el sistema de identificación (SI) y las pruebas de oscilación forzada utilizando un mecanismo plano (PMM, por sus siglas en inglés). Para el proceso experimental se empleó un ROV desarrollado en la Universidad de Sao Paulo, diseñado para realizar tareas de inspección visual e intervenciones marinas en campos petroleros *offshore*.

En el 2012, Kuhn et al. [24] presentaron la implementación de un controlador automático de orientación y profundidad, sin conocer un modelo dinámico previo de la ley de control y así mejorar las tareas de inspección, realizadas por un ROV, en estructuras sumergidas. El vehículo utilizado para las pruebas del controlador fue el ROVFURG-II, desarrollado en la Universidad de Rio Grande, Brasil. En el 2013, Drews et al. [25] describieron el desarrollo de un sistema para la detección de objetivos bajo el agua, usando visión por computador y un emisor de laser dual, permitiéndole al ROV realizar el seguimiento de objetivos en tiempo real y determinar la distancia entre el objetivo y el vehículo.

El Centro de Investigación (CENPES) de PETROBRAS, está enfocado en la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas para el monitoreo e inspección de todos los equipos y estructuras subacuáticas instaladas en el país. En el 2012, se estaba desarrollando un vehículo subacuático autónomo, para la inspección de tubos flexibles verticales. Este vehículo está equipado con 4 cámaras y tiene la capacidad de trabajar de manera autónoma durante 1 hora, a una profundidad máxima de 1000 m [26].

En Colombia, un grupo de investigadores de la Universidad Pontificia Bolivariana realizaron el diseño de un ROV para operar a 60 m de profundidad, que fue construido y sometido a pruebas en piscina. El ROV está equipado con una cámara frontal para realizar tareas de inspección visual para operaciones de manteniemiento en cascos de buques y estructuras sumergidas en puertos de investigación oceanográfica [27]. En 2012, dos estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander presentaron como trabajo de grado el desarrollo de un ROV con capacidad de alcanzar una profundidad máxima de 20 m. Adicionalmente, en la Escuela Naval Almirante Padilla han desarrollado 2 ROVs de inspección, construidos con tubos de PVC, tres impulsores, sensores y lógica programada [28].

En Venezuela, Molero et al. [29] describieron la implementación de un controlador predictivo de posición y orientación en un ROV. En Perú, la investigación en tecnología submarina está poco desarrollada, sin embargo, un estudiante de ingeniería electrónica de la Universidad Católica de Perú desarrolló un control electrónico para implementarlo en un submarino eléctrico experimental, con el fin de mejorar la navegación submarina en el Perú [30].

2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO (DPS)

2.1. ¿QUÉ ES UN DPS?

Un sistema de posicionamiento dinámico (DPS, *Dynamic Positioning System*), está definido como un conjunto de componentes que permiten controlar la posición y el rumbo de un vehículo acuático mediante la acción de propulsores para seguir una trayectoria preestablecida o mantener una posición fija [31, 32, 33, 34, 35].

Los DPS son empleados tradicionalmente para sistemas de baja velocidad y de alta precisión (*station keeping*), como en el abastecimiento de plataformas marinas, dragas, transbordadores, prospecciones de gas y petróleo, operaciones de seguimiento especializadas, manejo de cables, inspección de tuberías, operación de ROVs y otros [34, 36].

Las plataformas ancladas también hacen uso de los DPS para reducir el movimiento de baja frecuencia y reducir la tensión en las líneas de anclaje [36]. Los sistemas de posicionamiento diseñados para este tipo de funciones son denominados sistemas de posicionamiento dinámico amarrado (PM, *Position Mooring*) dado que gran parte del mantenimiento en posición es realizado por las líneas de anclaje, siendo los propulsores complemetarios [37]. Los PM, proporcionan una solución flexible para plataformas flotantes de perforación y explotación de hidrocarburos en campos pequeños y de baja profundidad [34].

El DPS es un sistema complejo compuesto por diversos sensores, propulsores y algoritmos de filtrado y de control. Los sensores se encargan de medir la posición del vehículo, mientras que los algoritmos calculan la fuerza que deben ejercer los propulsores para contrarestar las fuerzas ambientales como el viento, las olas y las corrientes, también denominadas fuerzas de deriva [33]. Siendo una de las tareas principales del DPS filtrar los movimientos con media cero de los datos de posicionamiento de la embarcación y contrarrestar las fuerzas que varían lentamente, siendo el objetivo del control reaccionar

ante las fuerzas de deriva con media diferente de cero sin responder a las fluctuaciones con media cero [31].

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DPS

Los DPS se clasifican en función del nivel de redundacia incorporado en el sistema [35, 38, 39]. Actualmente cada organización marítima cuenta con su propia notación, sin embargo, todas son equivalentes a la descripción establecida por la Organización Marítima Internacional (IMO, *International Maritime Organization*) o por la ABS (*American Bureau of Shipping*). En la Tabla 1 se encuentran las diversas organizaciones marítimas existentes a nivel mundial y sus notaciones correspondientes. A continuación, se describe la clasificación establecida por la IMO y luego la establecida por la ABS.

Tabla 1. Notaciones empleadas para la clasificación de los DPS [40]

IMO	**BV**	**DNV**		**ABS**	**GL**	**LR**	**NK**	**RINA**	**RS**	**IRS**	**CCS**	**NMD**	**KR**
equipment class	*Bureau Veritas*	*Det Norske Veritas*		*American Bureau of Shipping*	*Germanischer Lloyd*	*Lloyds Register of Shipping*	*Nippon Kaiji Kyokai*	*Registro Italiano Navale*	*Russian Register of Shipping*	*Indian Register of Shipping*	*China Classification Society*	*Norwegian Maritime Directorate*	*Register of Shipping (Korea)*
	DYNAPOS SAM	DYNAPOS AUTS	DPS 0	DPS-0		DP (CM)		DYNAPOS SAM				DPS 0	
Class 1	DYNAPOS AM/AT	DYNAPOS AUT	DPS 1	DPS-1	DP 1	DP (AM)	Class A DP	DYNAPOS AM/AT	DYNPOS-1	DP-1	DP-1	DPS 1	DPS (1)
Class 2	DYNAPOS AM/AT R	DYNAPOS AUTR	DPS 2	DPS-2	DP 2	DP (AA)	Class B DP	DYNAPOS AM/AT R	DYNPOS-2	DP-2	DP-2	DPS 2	DPS (2)
Class 3	DYNAPOS AM/AT RS	DYNPOS AUTRO	DPS 3	DPS-3	DP 3	DP (AAA)	Class C DP	DYNAPOS AM/AT RS	DYNPOS-3	DP-3	DP-3	DPS 3	DPS (3)

2.2.1. Clasificación de los DPS establecida por la IMO [39]

- **Equipo clase 1**
  El sistema no tiene redundancia. La embarcación puede perder su posición en caso de ocurrir una falla.

- **Equipo clase 2**
  Tiene redundancia, de tal manera que ninguna falla en un sistema activo causa la falla total del DPS. Es decir, la embarcación no puede perder la posición en caso de ocurrir una falla en un componente o sistema activo como generadores, propulsores, conmutadores, válvulas operadas remotamente, etc. Pero puede perder la

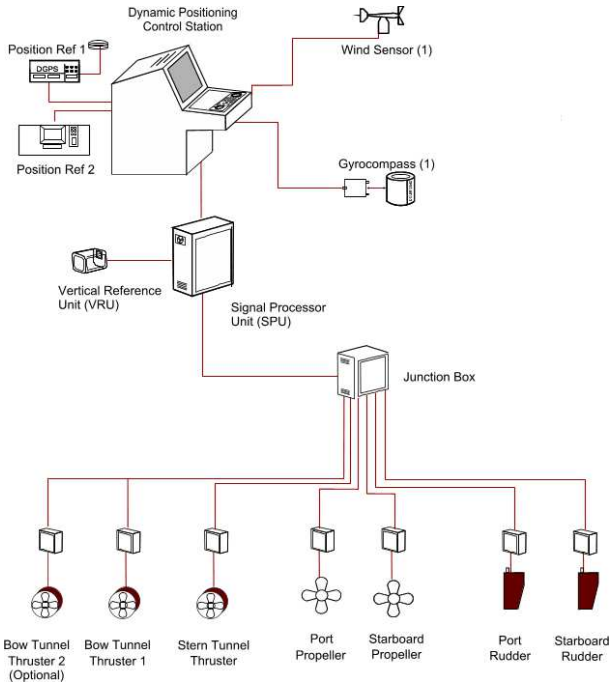
posición en caso de que fallen componentes o sistemas estáticos tales como: cables, tuberías, válvulas manuales, etc.

- **Equipo clase 3**
  El sistema no puede fallar en caso de ocurrir una inundación o un incendio en uno de los compartimentos. Es decir, la embarcación no puede perder la posición en caso de ocurrir una inundación en un compartimento hermético o un incendio en una de las subdivisiones de protección contra incendios.

2.2.2. Clasificación de los DPS establecida por la ABS [38]

- **DPS-0**
  Para embarcaciones equipadas con un control de posición manual centralizado y un sistema de control automático de rumbo, con el fin de mantener la posición y el rumbo bajo máximas condiciones ambientales, según sea especificado. El sistema no tiene redundancia. En la Figura 7 se observan los componentes que conforman esta clase de DPS.

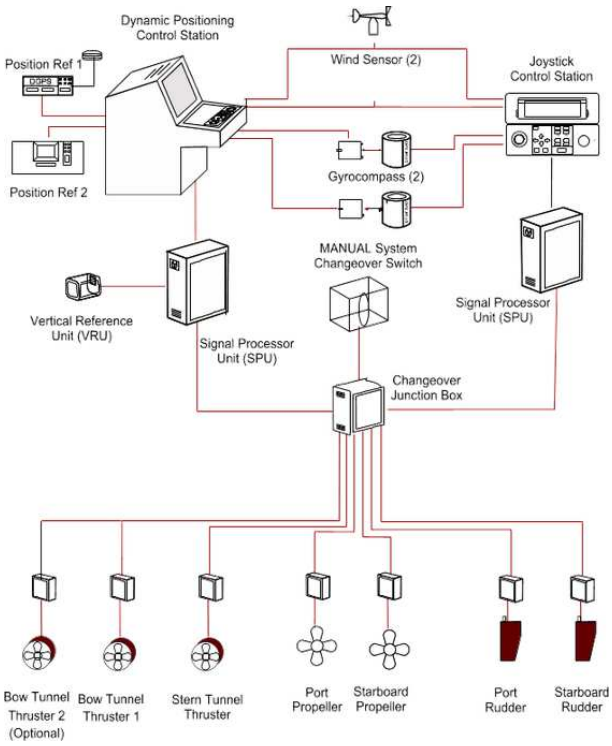
Figura 7. DPS-0 [41].



- **DPS-1**

  Para embarcaciones equipadas con un sistema de posicionamiento dinámico que tiene la capacidad de mantener la posición y el rumbo automáticamente bajo máximas condiciones ambientales, según sea especificado y adicionalmente cuenta con un sistema de control de posición manual. Equivalente a la clase Equipo 1, establecida por la IMO. En la Figura 8 se observan los componentes que conforman esta clase de DPS.

Figura 8. DPS-1 [41].



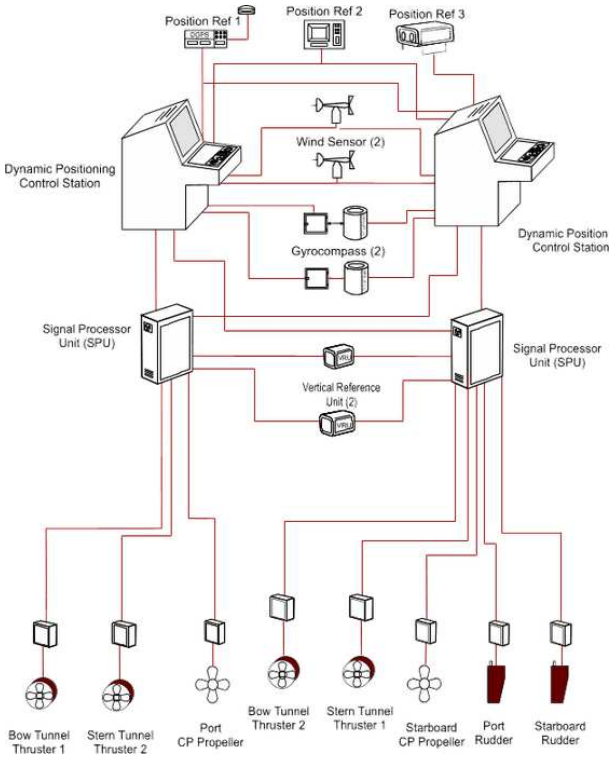
- **DPS-2**

  Para embarcaciones equipadas con un sistema de posicionamiento dinámico que tiene la capacidad de mantener la posición y el rumbo automáticamente dentro de un área específica y bajo condiciones ambientales máximas, durante y después de una falla en el sistema, excluyendo la pérdida de uno o varios compartimentos. Equivalente a la clase Equipo 2, establecida por la IMO. En la Figura 9 se observan los componentes que conforman esta clase de DPS.

- **DPS-3**

  Para embarcaciones equipadas con un sistema de posicionamiento dinámico que

Figura 9. DPS-2 [41].



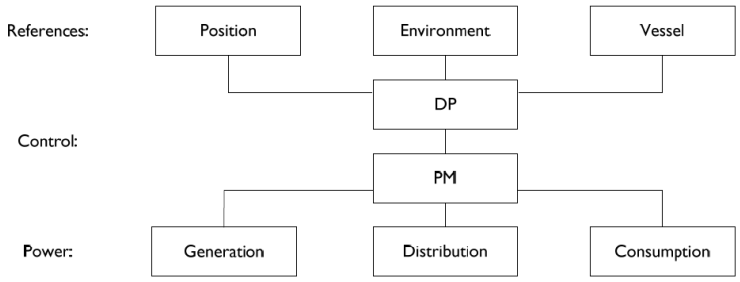
tiene la capacidad de mantener la posición y el rumbo automáticamente dentro de un área específica y bajo condiciones ambientales máximas, durante y después de una falla en el sistema, incluyendo la pérdida de uno o varios compartimentos a causa de una inundación o un incendio. Equivalente a la clase Equipo 3, establecida por la IMO.

2.3. COMPONENTES DE UN DPS

Un DPS comprende todo el equipo que afecta directa e indirectamente la habilidad de una embarcación a mantener su posición, abarcando 3 áreas importantes: potencia, control y referencias. La potencia se divide en generación, distribución y consumo (sistemas de propulsión). El control se refiere al manejo del sistema de potencia y de control de posición (manual o automática). Las referencias, son todos los sensores que miden la posición, las condiciones ambientales y la actitud de la embarcación [35]. En la

Figura 10 se observa los componentes básicos de un DPS y cómo se relacionan entre sí.

Figura 10. Componentes básicos de un DPS [35].



2.3.1. Sistema de potencia

El sistema de potencia comprende todas las unidades necesarias para proporcionar energía al sistema de posicionamiento dinámico [34]. El sistema de potencia está compuesto principalmente por los motores primarios y los generadores, el sistema de distribución (*switchboards*), los transformadores, los variadores de velocidad y un sistema de alimentación ininterrumpida [34, 38].

Algunos DPS cuentan con sistema de gestión de energía (PMS, *Power Management System*), el cual se encarga de proveer la energía necesaria para las operaciones básicas del DPS y previene cargas de arranque cuando la capacidad de los generadores es insuficiente [38]. Por lo tanto, los PMS son empleados para el control de energía, para el manejo de los generadores, para el uso compartido y desconexión de cargas, adicionalmente evitan apagones [34]. El PMS no aplica para generadores diesel, sin embargo, para el manejo de estos es ideal contar con un sistema que permita controlar el arranque y la parada de los generadores, con el fin de controlar el consumo de combustible y evitar inestabilidades en el sistema de potencia [35].

2.3.2. Sistema de propulsores

Es el conjunto de actuadores y propulsores encargados de mantener la embarcación en una posición fija o trasladarla en dirección longitudinal (*surge*), transversal (*sway*) y de guiñada (*yaw*) de forma independiente, proporcionando la fuerza de empuje y el movimiento de la embarcación [31, 34]. Este sistema debe tener la capacidad de actuar

rápidamente ante las órdenes del sistema de control del DPS, con el fin de contrarrestar las fuerzas de deriva y evitar perder la ubicación o el rumbo [31].

El sistema de propulsión está compuesto por los propulsores con sus respectivos sistemas de transmisión y sus sistemas auxiliares, incluyendo las tuberías, las propelas principales y los timones que estén bajo el control del DPS; los dispositivos electrónicos y manuales de control y todo el sistema de cableado [34, 38].

Para garantizar la seguridad del sistema y maximizar los límites seguros de operación, todas las unidades de propulsión deben ser independientes en cuanto a su ubicación, al tendido de cables, al sistema de control, de energía y de refrigeración. Adicionalmente, cada unidad de propulsión debe contar con su propio sistema de monitoreo y alarmas [35].

2.3.3. Sistema de control del DPS

El sistema de control del DPS comprende el hardware y el software necesario para posicionar la embarcación dinámicamente en un punto fijo [38].

El sistema de control se encarga de calcular y convertir en señales de control las fuerzas que deben ejercer los propulsores para mantener la embarcación en una ubicación establecida y se oriente hacia donde sean mínimas las fuerzas de deriva [31, 36]. El sistema de control está compuesto por:

- **Sistema informático:** este sistema comprende todos los dispositivos electrónicos programables como los PLC (*Programmable Logic Controller*), sistemas de control distribuido y los computadores [38].

- **Interfaz:** es el punto de transferencia donde se intercambia información. Algunas interfaces incluyen interfaz de entrada y de salida, donde se realiza la conexión con los sensores y actuadores respectivamente y la interfaz de comunicación, la cual permite la comunicación en red con otros ordenadores o periféricos (dispositivos que realizan funciones auxiliares en el sistema como el almacenamiento de datos y diagramas de registro) [38].

- **Joystick:** es el sistema manual de control de posición y el control automático de orientación [38].

- **Analizador de falla:** software cuya función es encender las alarmas en caso de perder el control sobre la posición y la orientación de la embarcación cuando ocurre una falla durante la operación o cuando las condiciones climáticas son extremas. Este software tiene la capacidad de calcular la disponibilidad de los propulsores para mantener la ubicación en caso de falla [38].

- **Modo de control:** son los algoritmos de filtro y de control que permiten el cálculo de las fuerzas que deben ejercer los propulsores para contrarrestar las fuerzas de deriva [33].

  Actualmente no se ha establecido un modo de control único para los DPSs. La no linealidad del sistema hace que la investigación en este campo permanezca abierta y se presenten diversas técnicas de control. En los años sesenta cuando se introdujo el primer DPS para movimiento horizontal, el modo de control consistía en algoritmos PID en cascada de una sola entrada y una sola salida con filtros *notch*, filtros pasa-bajos o filtros pasa-banda [34, 36, 32]. En los años setenta se introdujeron algoritmos de control multivariables basadas en el control óptimo y la teoría del Filtro de Kalman para filtrar los efectos de las olas, proponiéndose técnicas más avanzadas de control [34, 36]. En los noventa e inicios del dos mil se desarrollaron controladores y observadores no lineales para el control de los DPS [34].

  Hoy en día se busca integrar las características propias de los pilotos automáticos con las de los DPS, obteniendo un sistema único que permita trabajar a altas y bajas velocidades, en distintos tipos de operaciones y bajo diferentes condiciones climáticas [34, 36]. Hespanha [42] propuso el uso de la teoría de control híbrido, combinando eventos discretos con control continuo. La idea de utilizar sistemas de control híbridos es que tienen la habilidad de operar ambos controladores al mismo tiempo, permitiendo a la embarcación volver a la posición establecida sin importar el estado en el cual se encuentre [34, 36].

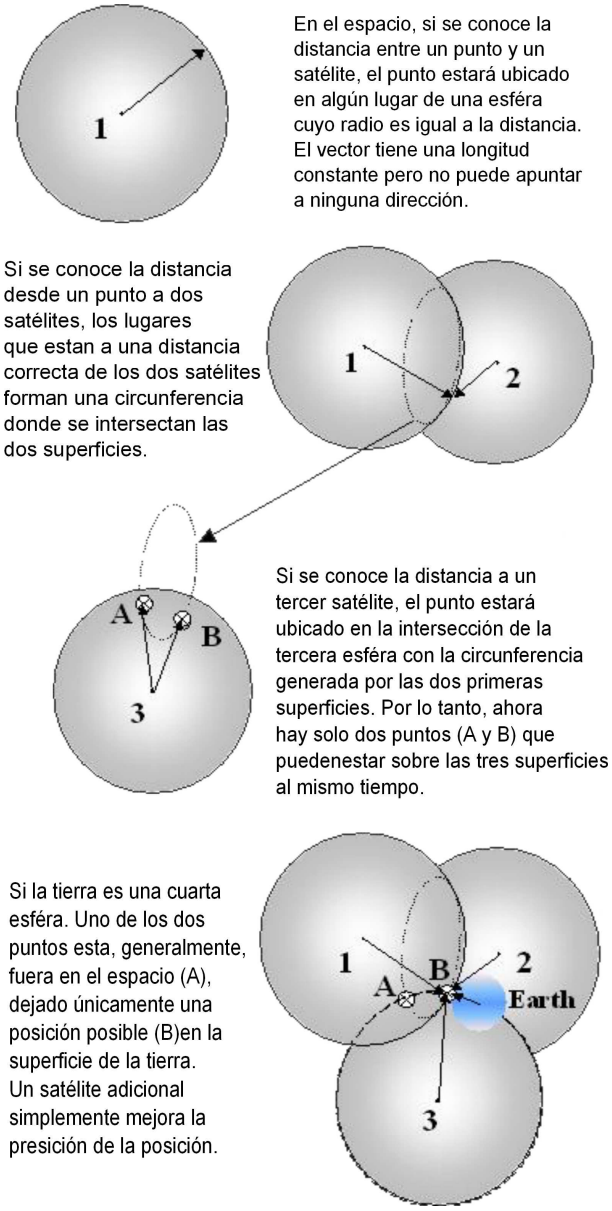
2.3.4. Sistema de referencia de posición

El sistema de referencia de posición (PRS, *Position reference system*) es el sistema que permite conocer la posición de la embarcación respecto a sus puntos de referencia [43]. Este sistema consiste en sensores de posición que en combinación con los sensores de viento, de movimiento y de orientación proveen información, al controlador del DPS, que puede afectar la posición de la embarcación. Dichos sensores, pueden suministrar información de posición relativa, magnitud y dirección de fuerzas ambientales [44]. Por lo tanto, el PRS está directamente asociado al sistema de control y comprende el hardware y el software necesario para suministrar la información y generar las correcciones necesarias en la posición de la embarcación [34]. Actualmente existe una gran variedad de PRS, sin embargo, la investigación en este campo continua avanzando y generando una mayor diversidad en los sistemas de posicionamiento. Los PRS más implementados hoy en día son los sistemas de referencia hidroacústicos (serán explicados en el Capítulo 3) y los sistemas de referencia satelitáles como el GPS y el GLONASS [45, 43].

Los sistemas de referencia satelitales consisten en una red de satélites en órbita, alrededor del globo terrestre. Estos emiten señales radioeléctricas continuas que pueden ser captadas por un dispositivo receptor para determinar su posición global en un sistema de tres coordenadas (X, Y, Z). Cuando el receptor capta la señal del satélite, identifica la hora de éste y la sincroniza con la hora registrada en su sistema, calculando el tiempo que tarda en recibir la señal. Conociendo el valor de velocidad de emisión, se puede determinar la distancia entre el receptor y el satélite [46, 47]. Sin embargo, para identificar la posición exacta del receptor es necesario conocer como mínimo la distancia entre éste y tres satélites, dado que el sistema de posicionamiento satelital se basa en un principio denominado triangulación. En la Figura 11 se puede observar el principio de triangulación, mediante el cual se calcula la posición con un sistema de posicionamiento satelital [46].

Actualmente existen 4 sistemas de referencia satelitales, el sistema GPS, el sistema GLONASS, el sistema Galileo y el sistema Beidou. Sin embargo, los más empleados en aplicaciones civíles son los sistemas GPS y GLONASS. El sistema GPS es el más amplio, cuenta con una red de 24 satélites, 21 operacionales y 3 de reserva. Los satélites estan configurados de tal manera que siempre esten 4 satélites visibles. Este sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los Estado Unidos

Figura 11. Principio de triangulación para determinar la posición mediante sistemas de posicionamiento satelital [48]



y se divide en dos códigos, el C/A (*Coarse/Acquisition*) que es habilitado para aplicaciones civíles y el código P (*Precision Code*) empleado en aplicaciones militares [46, 47]. El sistema GLONASS es el sistema de referencia satelital de la Federación de Rusia y cuenta únicamente con 21 satélites en órbita.

Por motivos de seguridad los sistemas GPS se ven afectados por diferentes fuentes de

error que dependen de la geometría del sistema, como la disponibilidad selectiva (SA, *Selective Availability*) y los derivados de la imprecisión de los relojes, sin embargo, existen otras fuentes de error que no dependen de la geometría como la actividad atmosférica y los rayos solares. Por lo tanto, es necesario contar con un sistema de posicionamiento que permita conocer la ubicación de manera precisa y en tiempo real, disminuyendo los efectos generados por las fuentes de error del sistema [49, 47].

Los sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS) permiten disminuir al máximo el error de localización utilizando los métodos de posicionamiento diferencial. Este método consiste en un receptor de GPS ubicado en una posición conocida que calcula la distancia a un conjunto de satélites y la diferencia entre la posición calculada y su ubicación exacta, lo que constituye el error de la medida. El error es transmitido en un código predefinido (RTCM, *Radio Technical Commision Maritime*) y cualquier usuario receptor con capacidad de corrección diferencial puede acceder a él para corregir su posición. Esta técnica elimina prácticamente los errores de la SA siempre y cuando el receptor diferencial esté ubicado cerca a la base emisora de la corrección. La señal puede ser transmitida desde una estación base propiedad de los usuarios, desde una estación virtual y vía estaciones de radio comerciales. En estos casos el modo de operación del DGPS se denomina área global (WADGPS, *Wide Area Differential GPS*) debido a que el error de cada satélite se procesa de forma individual [47].

Debido a que existe una gran variedad de PRS, su selección depende de las necesidades de la operación. En la mayoría de los casos se utilizan diversos PRS que funcionan simultáneamente conectados al controlador de forma independiente. Esto garantiza la precisión, la fiabilidad y la estabilidad, tres características básicas con las cuales deben cumplir mínimamente los PRS. De la precisión depende la exactictud en la posición de la embarcación, de la fiabilidad depende la seguridad de la operación y la estabilidad garantiza la actualización continua en la medición de la ubicación [43].

2.3.5. Sensores

Toda embarcación se ve afectada por factores externos como el viento, las corrientes y el oleaje, que por su naturaleza intentan desplazar el vehículo. Por este motivo, es importante medir sus parámetros de intensidad y dirección de tal forma que sea posible conocer las fuerzas ejercidas por estos para calcular la fuerza que deben generar los

propulsores y cotrarrestar los factores externos [45].

El sistema de sensores está constituido por todos los dispositivos de medida de orientación, como los magnetómetros; de posición, como las unidades de movimiento de referencia; de la velocidad y dirección del viento, como los anemómetros; entre otros [38]. Es importante que los datos suministrados por estos sensores esten monitorizados de manera continua para que el operador conozca en todo momento las condiciones meteorológicas de viento y de mar y así garantizar la seguridad de la operación [45].

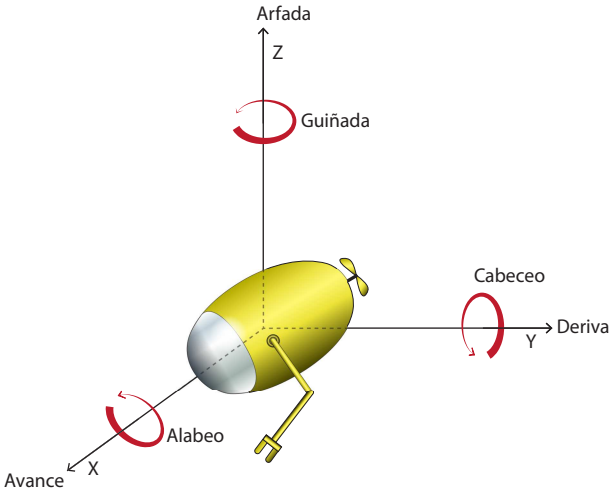
2.4. DPS PARA LA OPERACIÓN DE ROVS

El DPS utilizado para la operación de un ROV consiste en un sistema de control computarizado, el cual a partir de los datos obtenidos de los sensores de navegación tiene la capacidad de mantener automáticamente la posición y orientación del ROV mediante la acción de sus propulsores [50]. Estos DPS son usados generalmente para mantener una posición fija o para maniobras a baja velocidad, pueden controlar la posición, la actitud y afectar todos los grados de libertad del ROV automatizando el proceso de control [50]. Los vehículos subacuáticos al ser considerados cuerpos rígidos que se mueven libremente en un espacio tridimensional, poseen generalmente 6 grados de libertad asociados a 6 movimientos en los tres ejes coordenados, 3 movimientos de traslación y 3 movimientos de rotación, como se muestra en la Figura 12.

El objetivo de los DPS para ROVs es facilitar las diversas tareas que debe realizar el operador para maniobrar el vehículo, aumentando la eficacia y eficiencia de la operación, de tal forma que operadores jóvenes puedan pilotar el ROV con la misma destreza que un operador experimentado [50, 51, 52].

En 2004, Stanley desarrolló junto con la empresa Schilling Robotics un sistema de control avanzado que provee posicionamiento dinámico para ROVs, denominado StationKeep^{TM}. Este sistema de control usa un sensor de velocidad DVL (*Doppler Velocity Log*) para determinar la trayectoria y la altitud del ROV, los datos son integrados al software de control para determinar la posición precisa del vehículo respecto al suelo marino. El sistema de control StationKeep^{TM} toma la información del DVL y junto con la información

Figura 12. Movimientos de traslación y rotación de un ROV con 6 grados de libertad



de la unidad de movimiento, a bordo del buque, puede ofrecer el modo de operación automático. Esta opción permite al vehículo asumir el control de vuelo, manteniendo su posición y controlando el alabeo y cabeceo, tarea fundamental para el enfoque de la cámara o para la realización de tareas con el manipulador. El DPS, también permite el modo de operación de desplazamiento, donde el piloto sólo debe ingresar los datos y el sistema de control traslada el ROV automáticamente en la dirección deseada con una precisión de centímetros [52]. en la Figura 13 se puede ver los desplazamientos que se pueden automatizar con el sistema StationKeep^{TM}.

En 2007, Ioseba Tena introduce el SeeTrack Offshore, un nuevo DPS para ROVs que permite reducir costos de entrenamiento y operación automatizando el proceso de control del ROV. Este sistema es una plataforma de control intuitiva a los movimientos que debe realizar el ROV dependiendo de la misión, haciendo más fácil, segura y estable la operación del ROV, permitiéndole al piloto concentrarse en tareas adicionales a la navegación. Este sistema de control posee una arquitectura modular que consiste en tres módulos principales: módulo de operación o *Display Module*, el cual es la interfaz entre el piloto y el sistema de control; módulo de navegación, el cual recibe los datos obtenidos por el sensor de velocidad (DVL), de orientación y de profundidad para estimar la posición actual del vehículo y módulo de piloto automático, el cual se encarga de calcular la fuerza que deben ejercer los propulsores para ubicar el ROV en la posición deseada por el piloto [51]. En la Figura 14 se puede observar el diagrama de bloques del SeeTrack Offshore.

Figura 13. Desplazamientos automáticos realizados por StationKeep^{TM} [52].

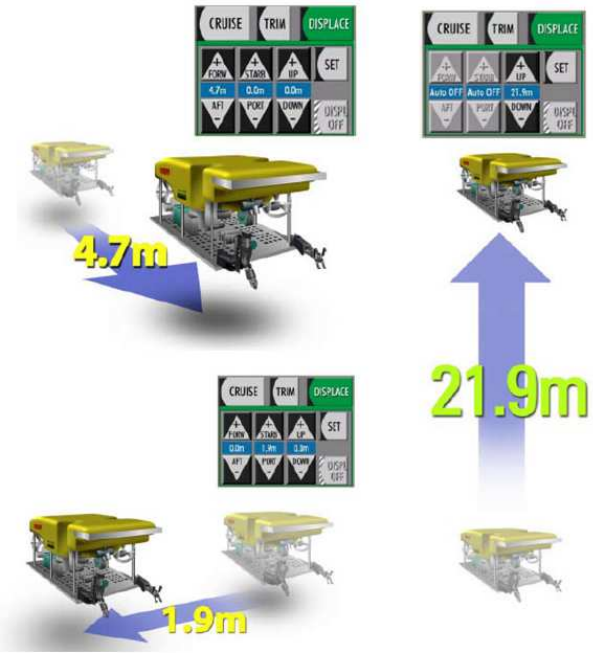
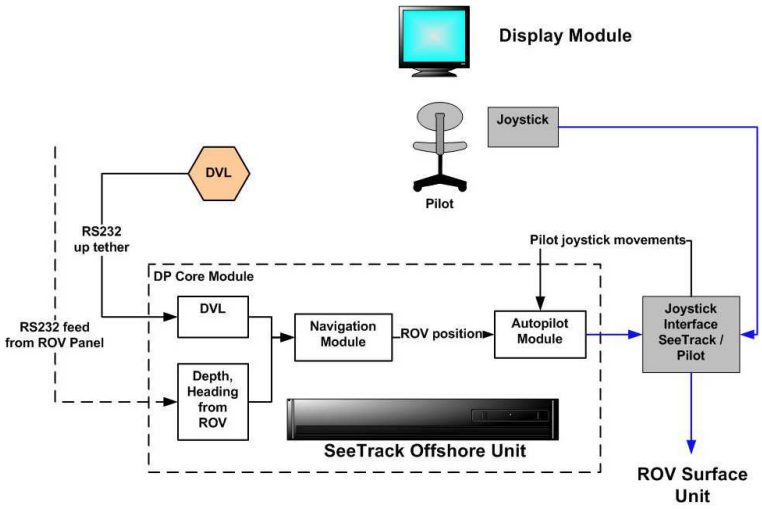


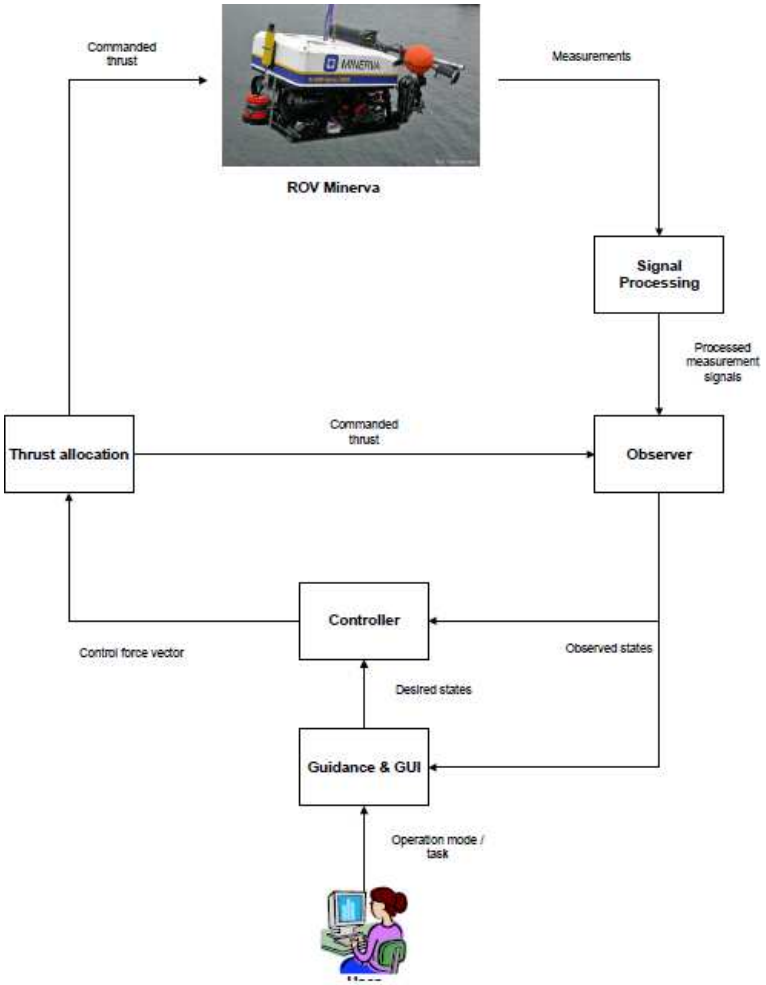
Figura 14. Arquitectura de control del SeeTrack Offshore [51].



En 2011, Dukan et al. [53] presentaron un DPS para ROVs implementando CompactRIO de *National Instruments* programado con Labview®. El DPS tiene una arquitectura de control por bloques de procesamiento con observador para filtrar la estimación de estado del ROV, con interfaz gráfica de usuario, un controlador y un sistema de asignación de empuje de los propulsores, como se ve en la Figura 15. Este DPS permite establecer

diversos modos automáticos de control, incluyendo la opción de decisión de trayectoria de movimiento en función de una variable de interés como la salinidad, la temperatura, entre otras. La diversidad en los modos de control busca que el piloto pueda enfocarse en las tareas que requieren una mayor intervención o toma de decisiones para facilitar y disminuir el tiempo de operación [53].

Figura 15. Arquitectura de control del DPS presentado por Dunkan et al. [53].



En 2012 las empresas Sonardyne International Ltda y Oceaneering International Inc. desarrollaron un sistema de pilotaje por cable (*Fly-By-Wire*) para el control de ROVs a cualquier profundidad. Este sistema permite mantener la posición de forma indefinida y navegar en tiempo y coordenadas reales automáticamente. El sistema de control cuenta con un sistema de navegación inercial (INS, *Inertial Navigation System*), con un sistema de referencia de actitud y orientación (AHRS, *Attitude and Heading Ref-*

erence System) e incorporó un sistema hidroacústico USBL como ayuda al INS. Estos sistemas de referencia y navegación permiten proveer al ROV de un DPS que garantiza su confiabilidad a cualquier profundidad sin afectar la facilidad de uso. El DPS cuenta con dos modos de control, el modo de navegación y el modo de tránsito o *passthru*. En el primer modo de control el DPS toma los datos del INS optimizados con el AHRS para determinar la posición dinámica en coordenadas reales, mejorando la precisión de control y manteniendo una posición determinada automáticamente. El segundo modo de control se activa automáticamente cuando el INS pierde la señal, implementando la técnica de navegación estimada (en inglés, *dead reckoning*) gracias a los datos del AHRS que son robustos y confiables cuando se combinan con el sensor DVL.

Todos los DPS para ROVs descritos anteriormente presentan una solución para mejorar y facilitar el mantenimiento en posición y la navegación de los ROVs. Lo que permite que el piloto se concentre en tareas más complejas sin preocuparse de la ubicación u orientación del ROV, disminuyendo el tiempo y la complejidad de la operación, permitiendole a nuevos pilotos la capacidad de maniobrar con mayor exactitud y precisión el ROV en cualquier misión.

3. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

El matemático Nathaniel Bowditch experto en navegación marítima, definió el término posición como: *"un punto definido por coordenadas fijas o implícitas, particularmente ubicado en la superficie de la tierra"* y el posicionamiento como: *"el proceso de determinar, en un tiempo específico, la posición física precisa de un buque, vehículo, persona o sitio"* [54]. Bowditch plantea una definición básica para ambos términos.

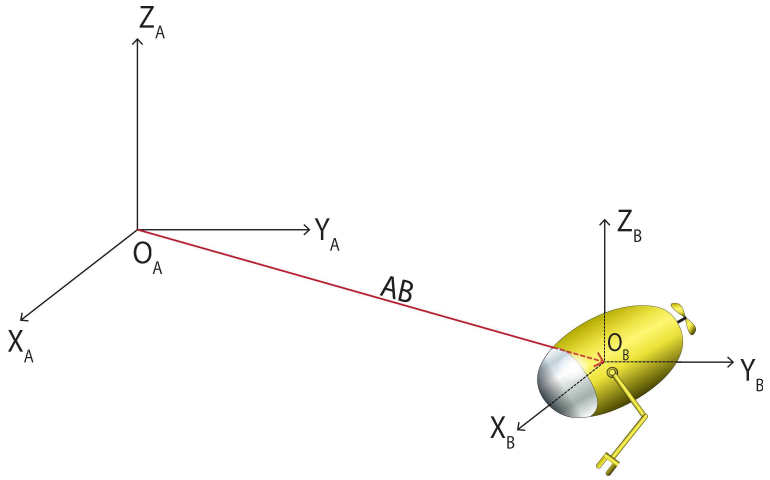
En la navegación marítima, el objetivo principal es trasladar una embarcación desde un punto de partida a un punto de llegada de forma segura, siendo necesario conocer la posición de la embarcación respecto a un punto de referencia, para asegurar que el vehículo realice la trayectoria predeterminada. Por lo tanto, al definir términos como posición o posicionamiento, en el campo de la navegación, es necesario hacer énfasis en el punto de referencia, pues de éste depende la ubicación del vehículo.

Al considerar un vehículo subacuático como cuerpo rígido, su posición física se representa con un vector posición (AB) respecto a un sistema coordenado con origen O_A. El centro de masa del vehículo se representa como el punto de origen O_B de su respectivo sistema coordenado, como se muestra en la Figura 16.

El vector posición AB se define por su origen en O_A y su extremo en O_B o por las coordenadas cartesianas de B con respecto a A, $(X_{B\to A}, Y_{B\to A}, Z_{B\to A})$ [55]. Por consiguiente, al conocer el vector AB se conoce la posición del vehículo subacuático respecto al punto de origen O_A, que en navegación marítima debe ser un punto con posición conocida respecto a la tierra.

Para la navegación marítima subacuática existen tres técnicas principales, navegación estimada (*dead reckoning*) y navegación inercial, navegación geofísica y sistemas de posicionamiento acústico [56]. En este capítulo se describe en qué consiste cada una de estas técnicas y la tecnología utilizada.

Figura 16. Posicionamiento relativo de un cuerpo respecto a una posición conocida



3.1. NAVEGACIÓN ESTIMADA Y NAVEGACIÓN INERCIAL

La navegación estimada (DR, por sus siglás en inglés) y la navegación inercial (INS, por sus siglés en inglés) están clasificadas en una misma categoría por ser las técnicas básicas de navegación subacuática. En ambas técnicas, se ingresan los datos de posición y velocidad inicial del vehículo. A partir del dato inicial y de los datos obtenidos de los sensores internos del ROV, se calcula la nueva posición [54, 56]. La desventaja de estas técnicas de navegación es el error de estimación que aumenta con el tiempo. Si el sistema no es reinicializado, el error de estimación de posición se acumula con cada proceso de cálculo durante la trayectoria del vehículo. Este error puede presentarse por fuerzas de deriva, efectos de corriente y errores de maniobrabilidad [54, 56].

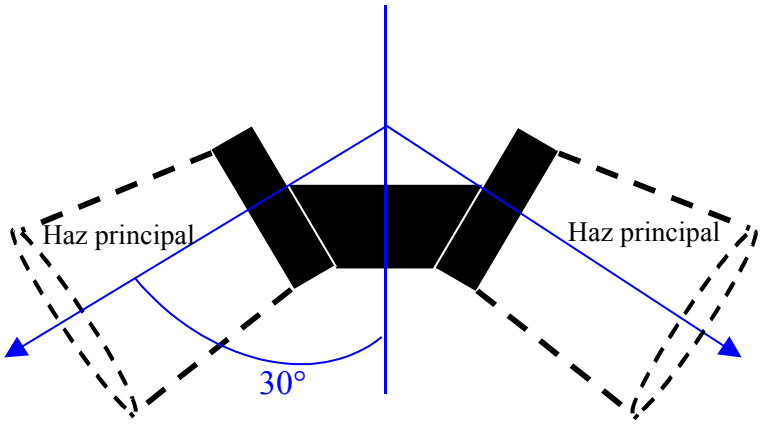
3.1.1. Navegación estimada

La navegación estimada consiste en integrar la velocidad del vehículo respecto al tiempo para conocer su trayectoria [56]. Anteriormente la velocidad del vehículo se calculaba en función de la velocidad de los propulsores respecto a la velocidad del agua, estimando únicamente la velocidad de avance sin tener en cuenta el efecto de las corrientes o deslizamientos, siendo un método poco sostenible para vehículos de baja velocidad. Por lo tanto, actualmente los sistemas de navegación cuentan con sensores de velocidad precisos como los DVL (*Doppler Velocity Log*), que miden la velocidad relativa al suelo

marino o a una columna de agua [56].

Los DVL son sensores que miden la velocidad de un ROV en sus tres ejes coordenados (X, Y, Z), que se integran al sistema de navegación para incrementar su precisión y desempeño [57, 58]. Los sensores constan de un transductor doppler con 4 emisores de señal de radio orientados hacia abajo y separados 30° de los ejes verticales del dispositivo. La Figura 17 es una vista esquemática de 2 de los 4 emisores principales de un DVL.

Figura 17. Emisores de señales de radio de un DVL [58].



El principio de funcionamiento de un DVL consiste en la emisión de señales acústicas oscilatorias a lo largo de cada uno de los emisores, luego, por desplazamiento doppler se mide la frecuencia del eco en cada uno de ellos, que es proporcional a la velocidad del suelo marino. Al medir la velocidad a lo largo de cada emisor, el DVL procesa la información para obtener la velocidad del instrumento en cada uno de los ejes coordenados [59, 60].

Adicionalmente, los DVL son instrumentos que tienen la capacidad de proporcionar información sobre la posición del ROV, colectando, compilando y procesando datos de velocidad, profundidad, altitud, cabeceo, alabeo, guiñada y temperatura [58]. El DVL procesa digitalmente las respuestas de los 4 emisores para calcular un vector de velocidades, $V_{emisor}(t)$ (4×1), el cual representa las velocidades del fondo en cada uno de los ejes coordenados y la medida del error.

Luego, el vector, $V_{emisor}(t)$ (4×1), se transforma al sistema de velocidades del instrumento (X, Y, Z) generando el vector $V_{DVL}(t)$, mediante una transformación lineal

$$V_{DVL}(t) = T \cdot V_{emisor}(t)$$

donde la matriz T es una matriz constante 4×4 que transforma el vector de velocidades de los emisores en un vector de velocidades del DVL (4×1)

$$V_{DVL}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ e(t) \end{bmatrix}$$

que representa las velocidades cartesianas $\dot{x}(t)$, $\dot{y}(t)$ y $\dot{z}(t)$ dentro del sistema de referencia del instrumento y $e(t)$, la medida del error en mínimos cuadrados.

Una vez se tiene el vector $V_{DVL}(t)$, éste se transforma en el vector de velocidades del marco de referencia global, V_{global}, mediante la transformación lineal

$$V_{global}(t) = \begin{bmatrix} R(t)_{3\times3} & 0_{3\times1} \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \cdot V_{DVL}(t)$$

donde $R(t)$ es la matriz de rotación ortogonal, del marco de referencia del DVL al marco de referencia global, ésta se calcula internamente con los datos de alabeo, cabeceo y guiñada obtenidos del sensor inercial integrado.

Finalmente, para obtener la posición del ROV, el vector $V_{global}(t)$ se integra [61]

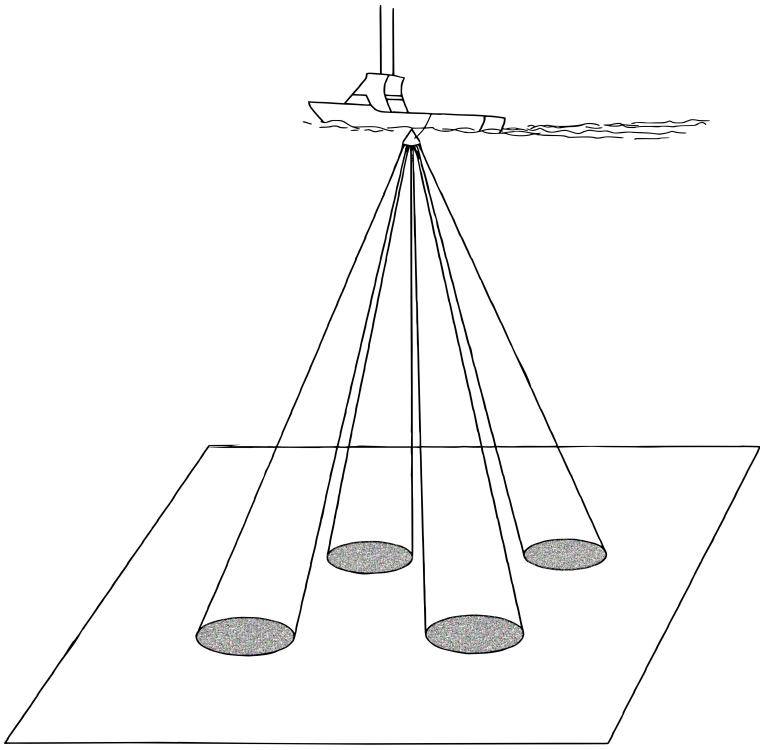
$$x_{global}(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^{t} V_{global}(\tau) d\tau$$

Donde $x(t_0)$ es la posición inicial ingresada al sistema.

Los DVL son sensores empleados en vehículos que trabajan cerca al suelo marino, con frecuencias de operación generalmente de 75 kHz en el extremo de baja frecuencia y 1.2 MHz en el extremo de alta frecuencia, entre más alta la frecuencia más cerca del fondo debe estar el vehículo, usualmente la distancia varía entre 30 m y 200 m, buscando garantizar que el instrumento esté en "Bloqueo de fondo", es decir, los 4

emisores de señal tienen líneas de visión sobre el fondo del mar, como se muestra en la Figura 18 [59, 60].

Figura 18. Representación de un DVL en "Bloqueo de fondo" [62]



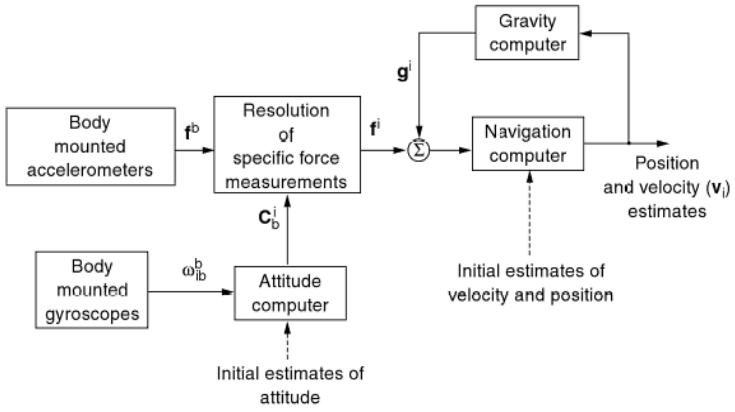
3.1.2. Sistemas de Navegación Inercial (INS)

Los sistemas de navegación inercial (INS, *Inertial Navigation System*) son sistemas con la capacidad de calcular la posición relativa respecto a un punto de referencia o a coordenadas absolutas sin necesidad de una fuente externa de posicionamiento [60, 63]. Al igual que los DVL, en los INS se ingresan los datos iniciales de posición y velocidad y a partir de estos el INS calcula los datos de posición y velocidad siguientes, integrando la información enviada desde la unidad de medición inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) [63].

Los INS son sistemas compuestos por diversos dispositivos, entre ellos el más importante es la IMU, la cual está constituida por 3 acelerómetros ortogonales y 3 giróscopos ortogonales que proporcionan una medición tridimensional de las aceleraciones lineales y de la velocidad angular [64]. Los otros dispositivos son componentes electrónicos y

computadores de navegación, que se encargan de calcular la aceleración gravitacional y de realizar las operaciones matemáticas necesarias para estimar la posición, velocidad lineal y orientación del ROV [64]. En la Figura 19 se puede observar el diagrama de bloques que define el proceso de cálculo realizado por un INS para estimar la posición y velocidad de un ROV.

Figura 19. Diagrama de bloques del sistema de posicionamiento inercial [65]



Hoy en día, los INS están diseñados para calcular la posición del submarino (latitud y longitud), sin embargo, hay INS que tienen la capacidad de determinar los datos de cabeceo, alabeo y guiñada. Existen otros que adicionalmente entregan información sobre movimientos de arfada, deriva y avance, contando con la capacidad de estimar el estado de los 6 grados de libertad de un ROV (ver Figura 12) [60].

3.2. NAVEGACIÓN GEOFÍSICA

La navegación geofísica es una técnica de navegación que consiste en la medición y observación de parámetros y características físicas del terreno, que son comparadas con un mapa previo del lugar de operación o con uno generado durante la misión, mediante mapeo o localización simultánea, con el fin de obtener una posición estimada del ROV [56, 66]. El mapeo y la localización simultánea elimina la necesidad de un mapa previo del terreno, usando la correlación de múltiples imágenes en tiempo real para crear un mapa batimétrico durante la misión y ser usado como referencia de navegación [56].

Lo que ha llevado a los investigadores a estudiar las técnicas de navegación geofísica ha sido, principalmente, obtener una alta precisión de navegación subacuática sin necesidad de una red acústica externa [56]. Sin embargo, el éxito de la navegación geofísica depende de las características del terreno. Éstas deben ser adecuadas para que el sistema pueda extraer paramétros útiles a partir de los datos obtenidos del sensor [66].

Los sensores más empleados para esta técnica de navegación son los sonares y los sensores ópticos. El implemento de sonares no es siempre útil, debido a la baja resolución y a la silueta amorfa de las características naturales del terreno subacuático. Los sensores ópticos se han estudiado en conjunto con técnicas de extracción automática de imágenes, siendo de mayor interés debido a que no requiere de una clasificación individual de los parámetros del terreno, condición necesaria cuando se emplean sonares como sensores de navegación [66].

La navegación geofísica es una técnica que está en proceso de estudio y puede ser una buena alternativa en un futuro, sin embargo actualmente no cuenta con alta confiabilidad por lo cual no se ha generalizado como una técnica principal de navegación subacuática, siendo la navegación acústica la técnica más implementada en pequeños vehículos subacuáticos [56].

3.3. NAVEGACIÓN ACÚSTICA

Los sistemas de navegación acústica constan de una red de transmisores y receptores de sonido, que permiten conocer la ubicación de un vehículo subacuático mediante el principio de triangulación, en base a la distancia existente entre el conjunto de transmisores externos y el receptor instalado en el ROV [56].

Los transmisores de sonido empleados en el posicionamiento subacuático, son dispositivos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, para generar un pulso de sonido omnidireccional en el agua, el cual puede ser captado por un receptor ubicado en cualquier dirección respecto a la fuente de señal [67]. Para los sistemas de posicionamiento acústico existen varios dispositivos que se comportan como transmisores, receptores o ambos. Los más utilizados son:

- **El interrogador:** es un dispositivo que se comporta como transmisor y receptor. Envía una señal acústica en una frecuencia y recibe la señal de respuesta en una frecuencia diferente [67].
- **El transpondedor:** es un receptor y transmisor instalado en el suelo marino o en el ROV, el cual recibe una señal proveniente de un interrogador o un transductor y envía una señal acústica como respuesta [56, 67].
- **El hidrófono:** es un dispositivo instalado en la plataforma de control, que tiene la capacidad, únicamente, de recibir las señales enviadas por el transpondedor [67].
- **El transductor:** es considerado la antena de un transpondedor o un interrogador, está conectado al sistema de control y tiene la capacidad de recibir y enviar señales.

El posicionamiento acústico es un problema básico de propagación del sonido y de triangulación. Si es posible calcular con precisión el tiempo y la velocidad que toma la trayectoria de una señal en viajar desde el transductor al transpondedor y del transpondedor al transductor, se puede conocer la distancia que hay entre el ROV y el punto de referencia (donde está ubicado el transductor), empleando la fórmula básica

$$D = V \times t$$

donde D es la distancia que hay entre el ROV y el punto de referencia, t el tiempo que toma la señal en viajar desde el transductor al transpondedor y V es la velocidad del sonido, que depende directamente del medio de propagación [67].

La velocidad del sonido en el agua depende de las condiciones ambientales, como la salinidad y la temperatura, por lo tanto, para estimar la distancia aproximada entre el transmisor y el transductor se puede tomar el valor promedio de la velocidad del sonido en el agua marina que es 1560 m/s, sin embargo, este valor genera un error de cálculo a medida que cambian las condiciones ambientales de la zona de operación. En caso de requerir mayor precisión en el posicionamiento del vehículo, existen diferentes métodos para calcular la velocidad del sonido en función de las propiedades del agua, para realizar la compensación y corregir el error [67, 68].

Una vez se tienen los datos de la velocidad del sonido y del tiempo que tarda la señal en viajar desde el transductor al transpodedor y volver nuevamente al transductor, se puede calcular el rango de operación, que es la distancia entre el vehículo y el punto de

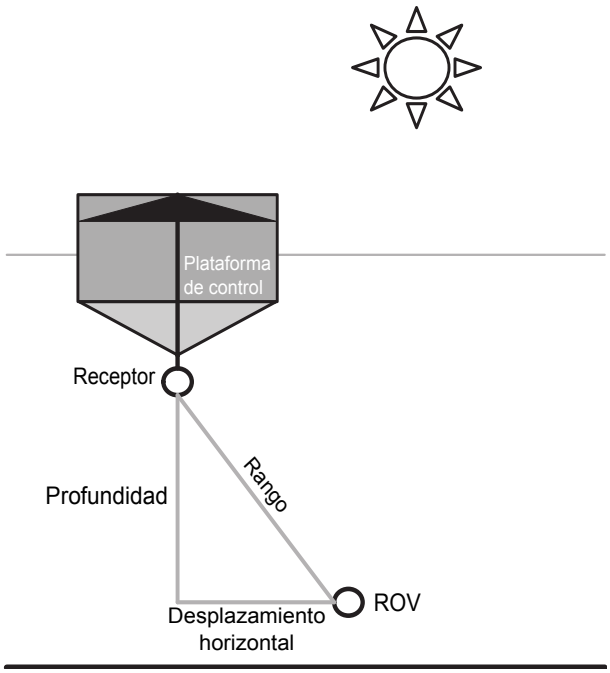
referencia, mediante la fórmula

$$R = \frac{1}{2}vt$$

donde R, el rango es la mitad de la distancia que tarda la señal de sonido en ir y volver, multiplicada por la velocidad del sonido en el medio de propagación [67].

El rango es uno de los parámetros necesarios para hallar la posición del ROV bajo el mar, sin embargo no es el único, también es necesario medir la profundidad, la cual se puede obtener fácilmente con el sensor de presión. Una vez se tiene el rango y la profundidad se conoce la longitud de dos lados de un triángulo rectángulo, y usando el teorema de Pitágoras se halla el tercer lado, que equivale al desplazamiento horizontal del vehículo (ver Figura 20). Siendo esta distancia, el radio que define la circunferencia sobre la cual puede estar posicionado el ROV que es denominada línea de posición (LOP, *Line of position*) [67].

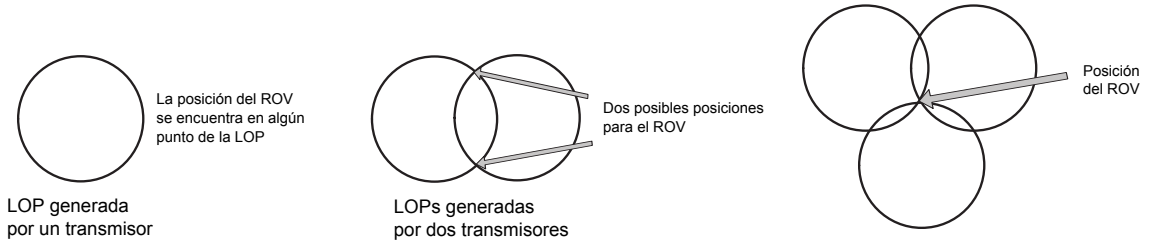
Figura 20. Esquema de cálculo del desplazamiento horizontal del ROV [67]



Como se mencionó anteriormente, el posicionamiento acústico es también un problema de triangulación, por lo tanto, para hallar la posición de un vehículo subacuático de manera exacta es necesario tener como mínimo tres transductores que generen tres

LOPs, las cuales se intersectan en un único punto que define la posición del ROV. En la Figura 21 se observa el principio de triangulación en sistemas de posicionamiento acústico.

Figura 21. Principio de triangulación en sistemas de posicionamiento acústico subacuático [67]



El conjunto de transductores, está organizado bajo un patrón conocido, creando un marco de referencia en forma de triángulo, cuyos lados son denominados línea de referencia o *baseline*. El marco de referencia puede estar fijo respecto al mismo conjunto de transductores, a la plataforma de control o a la tierra, de tal forma que el posicionamiento del ROV se pueda determinar frente al marco de referencia general [67].

Existen tres tipos de sistemas de posicionamiento acústico, los cuales se diferencian según la longitud de la línea de referencia. En la Tabla 2 se encuentran los sistemas de posicionamiento acústico básicos y a continuación se describe cada uno de ellos.

Tabla 2. Sistemas de posicionamiento acústico [69]

Sistema de posicionamiento acústico	**Longitud de la línea de referencia**
Long baseline (LBL)	100 – 6000 m
Short baseline (SBL)	10 – 20 m
Ultra short baseline (USBL)	$<$ 10 cm

3.3.1. Long baseline (LBL)

Los sistemas LBL constan de una red de transpondedores instalados en el suelo marino, calibrados generalmente para navegar dentro de un marco de referencia global. Se emplean entre 3 y 12 transpondedores para generar una red acústica de navegación

robusta y amplia, la cual depende de la misión del vehículo [56].

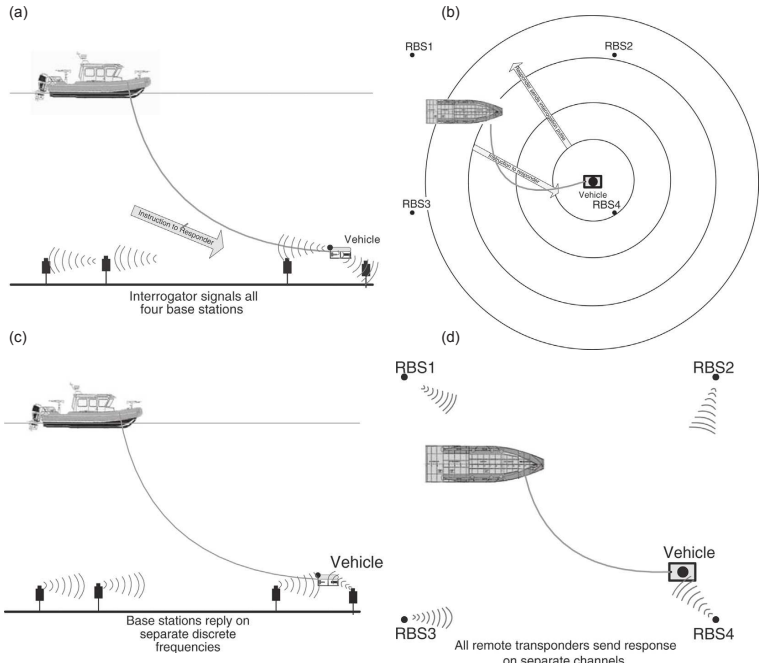
Cuando se define un marco de referencia global para la navegación acústica, es necesario hacer un proceso previo de calibración de los transpondedores de la red. Este proceso, consiste en el uso de interrogadores instalados en la embarcación de control, que envían señales de interrogación a cada transpondedor de forma repetitiva, para hallar su posición respecto al barco, del cual se conoce su posición global mediante el sistema de posicionamiento GPS. Por lo tanto, teniendo la posición de los transpondedores respecto al barco y la posición global de éste, se puede conocer la posición de los transpondedores dentro del sistema de posicionamiento global [56].

El posicionamiento de un ROV a través de un sistema LBL consiste en la emisión de una señal acústica desde el transductor o interrogador, instalado en el ROV. Cuando la señal acústica es detectada por la red de transpondedores, estos envían una señal de respuesta al interrogador en una frecuencia diferente a la emitida por el interrogador. En función del tiempo que transcurre entre la emisión de la señal de interrogación, hasta que se recibe respuesta del transpondedor, y conociendo la velocidad del sonido en el agua, se calcula la distancia que hay entre el ROV y los transpondedores, estimando la posición del vehículo mediante el pricipio de triangulación, mencionado en la sección anterior [67]. En la Figura 22 se puede observar el proceso de posicionamiento en un sistema LBL.

Los sistemas LBL se caracterizan por tener la mejor precisión en el posicionamiento de vehículos subacuáticos, debido a la gran longitud que tienen las líneas de referencia y por su condición de estar fijos en el suelo marino, lo que evita la necesidad de compensar los errores generados por el movimiento de los transpondedores [70].

La mayoría de sistemas LBL tienen la capacidad de posicionamiento sin tener en cuenta la profundidad de operación, esta característica depende de la frecuencia de operación. Entre mayor sea la frecuencia acústica menor es el rango de posicionamiento, debido a la alta atenuación del sonido de alta frecuencia en el agua. Los sistemas LBL empleados en operaciones a altas profundidades son sistemas que trabajan a 12 kHz, los cuales tienen la capacidad de trabajar hasta una profundidad de 10 km con una precisión de 0.1 m a 10 m, dependiendo del rango de operación, con un periodo de actualización de hasta 20 s.

Figura 22. (a) Interrogador envía señal. (b)Transpondedores reciben la señal. (c) Transpondedores envían señal de respuesta (d) Interrogador recibe respuesta en diferentes canales [67]



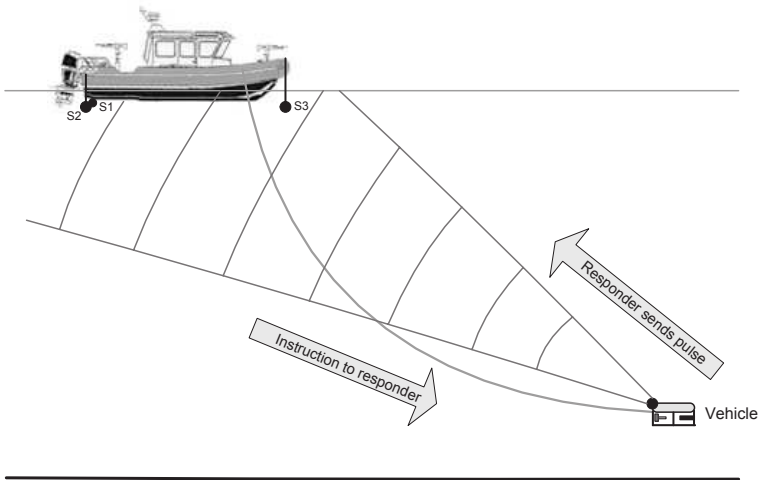
Las principales desventajas de estos sistemas son la cantidad de componentes necesarios para su instalación y el tiempo que tarda el proceso de instalación, calibración y luego de recuperación [67].

3.3.2. Short baseline (SBL)

Los sistemas SBL constan de un transpondedor instalado en el ROV que se comunica con una red de transductores e hidrófonos. Los cuales, están ubicados especialmente en el fondo de la plataforma de control bajo un sistema de referencia conocido y separados unos de otros tanto como sea posible. Normalmente la distancia entre los transductores es de 10 a 20 m, formando un triángulo o rectángulo según el número de dispositivos acústicos que componen la red, como se observa en la Figura 23 [56, 67, 69].

La red acústica instalada en la plataforma de control está compuesta, generalmente, por uno o dos transductores y varios hidrófonos. Por lo tanto, sólo el transductor envía la señal interrogante al transpondedor, pero todos los dispositivos de la red detectan la

Figura 23. Configuración de un sistema de posicionamiento SBL [71]



señal de respuesta. De este modo, se obtiene el tiempo de ida y vuelta de la señal, entre el transductor y el transpondedor y una diferencia entre el tiempo de llegada de la señal a los diferentes hidrófonos. El tiempo de ida y vuelta, permite calcular el rango entre el transpondedor y el transductor y la diferencia entre los tiempos de llegada de la señal, permite determinar la orientación del transpondedor desde la embarcación. Obteniendo la posición del ROV relativa a la plataforma de control, donde está instalada la red de receptores [67, 72].

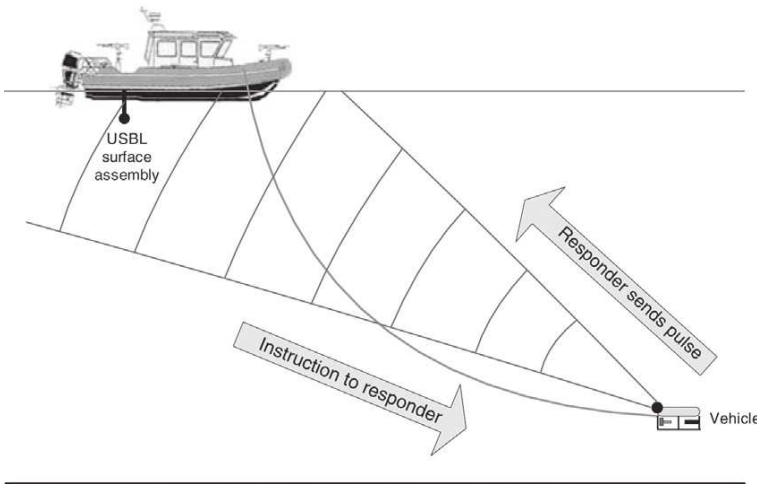
El SBL es el sistema de posicionamiento acústico más antiguo. Instalado por primera vez en 1963 en el submarino *Trieste I*, para la misión de búsqueda del submarino nuclear *USS Thresher* [56]. El sistema SBL cuenta con una configuración simple, que no requiere la instalación de transpondedores a lo largo del suelo marino. Sin embargo, estos sistemas no son de alta precisión cuando son instalados en plataformas de control pequeñas, debido a que la distancia entre los transductores e hidrófonos no es lo suficientemente amplia para que se dé con precisión el principio de triangulación, cuando se trabaja en una zona muy alejada de la estación de superficie [67, 72].

3.3.3. Ultrashort baseline

Los sistemas USBL, también conocidos como SSBL (*super short baseline*), constan de un transpondedor instalado en el ROV, el cual se comunica mediante señales acústicas

con una red de transductores, todos ensamblados en un mismo dispositivo, fijo a la plataforma de control, denominado transceptor [56, 67]. En la Figura 24 se observa la configuración de un sistema USBL.

Figura 24. Configuración de un sistema de posicionamiento USBL [67]



Los sistemas USBL calculan la posición de un ROV en base al rango y a la orientación del vehículo. El rango se calcula con la metodología explicada en secciones anteriores. Mientras que la orientación, se calcula midiendo la diferencia del tiempo de fase de las señales sinusoidales recibidas por cada transductor. Dado que los transductores tienen una posición y orientación específica, la diferencia en el tiempo de fase, entre las señales recibidas, permite calcular mecánicamente el ángulo de incidencia de la señal. El cual es usado para calcular la orientación del transpondedor respecto al transceptor [56, 67].

La principal ventaja de los sistemas USBL es que no requiere una gran cantidad de componentes para su instalación y configuración, sólo requiere la estación de operación y el transceptor, que pueden ser instalados en todo tipo de plataforma de control y el transpondedor que va instalado en el ROV [56, 67, 72]. Adicionalmente, al estar la red de transductores ensamblada en un mismo transceptor, que está ubicado en una posición determinada dentro de la embarcación, permite que el sistema de referencia sea el mismo para la embarcación, para el transceptor y para el ROV, siempre y cuando se cuente con sensores de posicionamiento inercial y de GPS para compensar los posibles errores generados por condiciones ambientales externas [67].

4. ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO PARA UN ROV

En este capítulo se hace el análisis de los sistemas de posicionamiento descritos en el capítulo anterior, en función de las condiciones de operación del ROV que está siendo desarrollado, actualmente, por el Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana. Y se presentan las alternativas comerciales que cumplen con las condiciones mencionadas a continuación.

El ROV, tiene como requerimiento básico alcanzar una profundidad operacional de 500 m, para apoyar procesos de exploración petrolera de los fondos marinos. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que el sistema de posicionamiento tenga un rango igual o superior a la profundidad de operación requerida. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el ROV no contará con una embarcación de operación especial. Éste será operado desde diferentes embarcaciones según la disponibilidad presente a la hora de realizar un misión exploratoria. Lo que implica que el sistema de posicionamiento sea un sistema portable, de fácil instalación y configuración.

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados, se hace un análisis de las ténicas de navegación y de los sensores descritos en el Capítulo 3.

- **Técnicas de navegación estimada**

  Los sensores empleados en técnicas de navegación estimada son sensores DVL y sensores inerciales, como la IMU (descritos en la Sección 3.1). Estos sensores son ampliamente utilizados en los DPS, puesto que mejoran el desempeño y precisión de los sistemas de navegación. Además, debido a que no dependen de un sistema de referencia con el cual deben estar en comunicación continua, los sensores proveen información con alta frecuencia de actualización.

  Sin embargo, la técnica de navegación estimada no permite conocer con certeza la posición del ROV relativa a la plataforma de control o al sistema de referencia

definido, cuando se realizan largas misiones de exploración. Esto se debe a la acumulación del error de estimación, el cual incrementa con el tiempo. Por este motivo los sistemas de posición estimada deben ser reinicializados constantemente, necesitando de un sistema de posicionamiento adicional que le indique la posición del ROV respecto al sistema de referencia.

- **Técnicas de navegación geofísica**

  Dado que la técnica de navegación geofísica aun continua en estudio, no se encontraron alternativas comerciales disponibles para la evaluación de este sistema de posicionamiento. Los sonares y sensores ópticos empleados en los ROV son usados para tareas de inspección, por el momento no se han implementado de forma masiva para la navegación subacuática.

- **Sistemas de posicionamiento acústico**

  Los sistemas de posicionamiento acústico fueron los primeros sistemas de posicionamiento subacuático [67]. Por lo tanto, son los sistemas más empleados para la navegación de vehículos submarinos.

  Teniendo en cuenta los requerimientos básicos de operación del ROV y el principio de funcionamiento de los 3 sistemas de posicionamiento acústico, el sistema USBL es el que mejor se adapta a las condiciones mencionadas, por la fácilidad de instalación, calibración y la poca complejidad de sus componentes. Adicionalmente, existen diversas opciones comerciales de sistemas de posicionamiento USBL portables.

  Los sistemas LBL y SBL requieren de complejos procesos de instalación y calibración, además el sistema SBL requiere de una plataforma de control de grandes dimensiones para garantizar la precisión en el posicionamiento del ROV.

4.1. TABLA DE ALTERNATIVAS COMERCIALES PARA SISTEMAS USBL

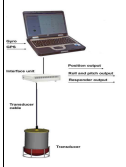
En esta sección, se presenta la matriz donde se desglosan las características principales de las alternativas comerciales, para sistemas de posicionamiento USBL. A continuación se describen las categorías seleccionadas para la clasificación de las características de los sistemas.

- **Características técnicas**
  - Materiales: se especifica el material principal del cual están fabricados los componentes del sistema.
  - Dimensionales: se mencionan las medidas externas de los componentes, que se deben tener en cuenta para la instalación.
  - Normativas: normas ISO (*International Organization for Standardization*), ASTM (*American Society for Testing Materials*), grados de protección IP, entre otras.
  - Tecnológicas: son las características relativas al software o hardware necesario para la operación.
  - Otras: características técnicas, adicionales, que deban ser mencionadas.
- **Características de uso**
  - Especificaciones: características de operación, tales como: rango, precisión, temperatura de operación, frecuencia de señal, entre otras.
  - Funcionamiento: características requeridas para el funcionamiento, tales como: consumo de potencia, señal de salida, entre otras.
  - Mantenimiento: recomendaciones de uso y cuidado de los instrumentos.
  - Información disponible: documentos del instrumento que se tengan disponibles, tales como: fichas técnicas, manual de instrucciones, cotizaciones, entre otros.
  - Otros: características de uso, adicionales, que deban ser mencionadas.

En la Matriz 4.1.1, se presentan las alternativas comerciales para sistemas de posicionamiento USBL.

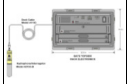
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D.
PROYECTO: Programa estratégico para el desarrollo de tecnología robótica orientada a la exploración petrolera de los fondos marinos colombianos.

MATRIZ 4.1.1 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

Principio de funcionamiento	Alternativa comercial	Imagen	Componentes del sistema	Características técnicas					Características de uso				Fabricante	Costo
				Materiales	Dimensionales	Normativas	Tecnológicas	Otras	Especificaciones	Funcionamiento	Mantenimiento	Información disponible	Otros		
USBL	HPR410P		Unidad portable	No reporta	Ancho: 53 cm Alto: 36 cm Largo: 56 cm Peso en el aire: 33 kg	No reporta	Computador portátil,con software APOS . Unidad de transceptores, se procesan señales acústicas, se calcula la posición del transpondedor y se envía la información al computador. Compatible con DPS y sistemas de posicionamiento externos.	Sistema resistente a salpicaduras de agua y golpes. Portable	Temperatura de operación: -10° - 55° C Temperatura de almacenamiento: -40° - 70° C Frecuencia media (MF): 21 kHz - 32,5 kHz	Voltaje de operación: 230 Vac (110 Vac, bajo pedido)	Se hace referencia al manual de instrucciones en el Anexo C	Ficha técnica Manual de instrucciones HPR410P Manual de instrucciones del transpondedor MST319	Es compatible con unidades de referencia vertical, para compensar automáticamente los movimientos de alabeo y cabeceo de la plataforma de referencia.	Kongsberg Maritime	66,919.55 USD
			Transductor	No reporta	Altura: 41 cm Diámetro: 10 cm Peso en el aire: 8,6 kg Peso en el agua: 6,1 kg Longitud del cable: 30 m	No reporta			Precisión del inclinómetro: 0,2° Precisión: 2% del rango Frecuencia media (MF): 20 kHz - 32 kHz Ángulo de emisión: ± 80°	No reporta					
			Transpondedor MST319	Aluminio anodizado revestido de poliuretano	Altura: 34,8 cm Diámetro: 7,6 cm Peso en el aire: 2,4 kg Peso en el agua: 1 kg	No reporta			Profundidad máxima de operación: 1.000 m Ángulo de emisión: ± 90° Temperatura de operación: 0° - 30° C **Transmisor**: Potencia: 100 W máximo Frecuencia: 27 kHz - 32,5 kHz Longitud de pulso: 10 ms **Receptor:** Ancho de banda (-3 dB): 20 kHz - 32,5 kHz	Disponible con batería recargable o con fuente de energía externa a 22 - 26 Vdc (40W)					
USBL	HiPAP351P		Interfaz	No reporta	Ancho: 25,5 cm Alto: 8 cm Largo: 32,5 cm Peso: 3,7 kg	IP 21	Punto de conexión de cableado de la unidad de transductores y la estación de operación. Compatible con DPS y sistemas de posicionamiento externos.	Contiene una fuente de energía. Se puede usar con transpondedores configurados en modo Cymba®, el cual aumenta la precisión en un 30% bajo condiciones de ruido	Temperatura de almacenamiento: 20° - 85° C Humedad de almacenamiento y operación: 5 - 95 % relativa	Potencia de alimentación: 85 - 264 Vac Potencia de salida: 48 dc Frecuencia: 47 - 63 Hz Consumo máximo de corriente: 4 A a 115 Vac o 2 A a 230 Vac Consumo normal de corriente: 0,5 A Potencia nominal: 350 W	Se hace referencia al manual de instrucciones en el Anexo C	Ficha técnica Manual de instrucciones HiPAP 351P Manual de instrucciones del transpondedor MST319		Kongsberg Maritime	139,660.63 USD
			Transductor	Bronze y acero inoxidable	Alto: 53,1 cm Diámetro externo: 33,8 cm Peso en el aire: 40 kg Peso en el agua: 12 kg	IP 68	Compuesto por el conjunto de transductores y unidad de movimiento inercial (IMU)		Rango de operación: 1 - 4000 m Precisión: 0,3 % del rango Temperatura de almacenamiento: -40° - 70° C Temperatura máxima de operación: 35° C Humedad de almacenamiento: 95 % relativa	Conexión a la interfaz vía Ethernet.					
			Transpondedor MST319	Aluminio anodizado revestido de poliuretano	Altura: 34,8 cm Diámetro: 7,6 cm Peso en el aire: 2,4 kg Peso en el agua: 1 kg	No reporta			Profundidad máxima de operación: 1.000 m Ángulo de emisión: ± 90° Temperatura de operación: 0° - 30° C **Transmisor:** Potencia: 100 W máximo Frecuencia: 27 kHz - 32,5 kHz Longitud de pulso: 10 ms **Receptor:** Ancho de banda (-3 dB): 20 kHz - 32,5 kHz	Disponible con batería recargable o con fuente de energía externa a 22 -26 Vdc (40W)					3,373.51 USD
														143,034.14 USD
USBL	µPAP 201H		Transductor	Bronze y acero inoxidable	Longitud: 40 cm Diámetro: 19 cm Peso: 17 kg	No reporta	El software de posicionamiento es APOS. Cuenta con protocolo acústicos Cymba® que proporciona posicionamiento acústico de banda ancha y transmisión de datos acústicos. No es compatible con otros softwares de posicionamiento.	Cuenta con unidad de medición inercial integrada para compensar movimientos de alabeo, cabeceo y guiñada.	Rango: 1 - 4000m Máx profundidad de inmersión: 50 m Precisión: 0,45 % Ángulo de emisión: 160° Ángulo de recepción: 22° dirigible Temperatura de operación: 0° - 35° C Temperatura de almacenamiento: -20° - 35° C Humedad de almacenamiento: 95 % relativa		No reporta	Ficha técnica		Kongsberg Maritime	81,837.40 USD
			Transpondedor MST319	Aluminio anodizado revestido de poliuretano	Altura: 34,8 cm Diámetro: 7,6 cm Peso en el aire: 2,4 kg Peso en el agua: 1 kg	No reporta			Profundidad máxima de operación: 1.000 m Ángulo de emisión: ± 90° Temperatura de operación: 0° - 30° C **Transmisor:** Potencia: 100 W máximo Frecuencia: 27 kHz - 32,5 kHz Longitud de pulso: 10 ms **Receptor:** Ancho de banda (-3 dB): 20 kHz - 32,5 kHz	Disponible con batería recargable o con fuente de energía externa a 22 -26 Vdc (40W)	Se hace referencia al manual de instrucciones en el Anexo C	Manual de instrucciones			3,373.51 USD
														85,210.91 USD

GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D.
PROYECTO: Programa estratégico para el desarrollo de tecnología robótica orientada a la exploración petrolera de los fondos marinos colombianos.

MATRIZ 4.1.1 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

Principio de funcionamiento	Alternativa comercial	Imagen	Componentes del sistema	Características técnicas					Características de uso					Fabricante	Costo
				Materiales	Dimensionales	Normativas	Tecnológicas	Otras	Especificaciones	Funcionamiento	Mantenimiento	Información disponible	Otros		
USBL	TrackLink 1500LC		PC tracking software Transceptor Transpondedor	No reporta	**Transceptor** Longitud: 24 cm Diámetro: 12,6 cm Peso en el aire: 3,5 kg Peso en el agua: 1,2 kg	No reporta	Utiliza tecnología *Broadband Acoustic Spread Spectrum* (BASS). Software de navegación, *Tracklink Navigator Windows*, integra el transceptor con los sensores de movimiento y GPS/DGPS usando comunicación serial		Rango: 1000 m Profundidad máxima de operación: 1500 m Ángulo de emisión: 120° - 125° Precisión: 5% del rango Frecuencia de operación: 31,0 - 43,2 kHz Temperatura de operación: -5° C - 45° C Temperatura de almacenamiento: -25° C - 75° C	Consumo de potencia en modo transmisor: 10 W Consumo de potencia modo recepción: 1,6 W	No reporta	Ficha técnica		LinkQuest Inc.	18,100.00 USD
USBL	BATS - Full Rack Mount System		Computador portátil Módulo de transceptor Hidrófono	No reporta	**Módulo transceptor:** Altura: 8,8 cm Ancho: 48 cm Largo: 50,8 cm Peso: 9,5 kg **Hidrófono:** Longitud: 49,3 cm Diámetro: 7,4 cm Peso: 4,5 kg **Cable:** Longitud: 30 m Diámetro punta seca: 6 cm Diámetro punta húmeda: 3,5 cm Peso: 6,4 kg	No reporta	Windows *Trackman*software, que cuenta con funciones de visualización de datos, posicionamiento de múltiples objetivos y gráfica de trayectorias.		Rango y profundidad máxima de operación; 1500 m Presición en posicionamiento horizontal: 0,5% del rango Precisión de repetitibilidad: 0,25% del rango Resolución angular: 0,08° Frecuencia de operación: 17 – 30 kHz Temperatura de operación y almacenamiento: -4° C – 40° C	Potencia de salida: 100 o 400W Usa conexión Ethernet al computador	Se hace referencia al manual de instrucciones	Manual de instrucciones Brochure Ficha técnica de transpondedor 4370 Cotización		ORE Offshore EdgeTech	45,000 USD
			Transpondedor omnidireccional 4370	Aluminio anodizado	Longitud: 29 cm Diámetro: 7 cm Peso: en el aire: 2 kg Peso en el agua: 0,8 kg	No reporta			Rango: 1000 m Frecuencia de interrogación: 15, 17 o 19 kHz Tiempo de ida y vuelta de la señal (transponder/responder): 15 ms/2 ms	Batería recargable NiCad de 1,0 A Incluye cargador					
USBL	BATS - Desktop System		Computador portátil Módulo transceptor Hidrófono	No reporta	**Módulo transceptor:** Altura: 8,8 cm Ancho: 48 cm Largo: 50,8 cm Peso: 9,5 kg **Hidrófono:** Longitud: 49,3 cm Diámetro: 7,4 cm Peso: 4,5 kg **Cable:** Longitud: 30 m Diámetro punta seca: 6 cm Diámetro punta húmeda: 3,5 cm Peso: 6,4 kg	No reporta	Windows *Trackman*software, cuenta con funciones de visualización de datos, posicionamiento de múltiples objetivos y visualización gráfica de las trayectorias.	Sistema resistente a salpicaduras. Portable	Rango y profundidad máxima de operación: 1500 m Presición en posicionamiento horizontal: 0,5% del rango Precisión de repetitibilidad: 0,25% del rango Resolución angular: 0,08° Frecuencia de operación: 17 - 30 kHz Temperatura de operación y almacenamiento: -4° C – 40° C	Potencia de salida: 100 o 400W Usa conexión Ethernet al computador	Se hace referencia al manual de instrucciones en el Anexo C	Manual de instrucciones Brochure Ficha técnica de transpondedor 4370 Cotización		ORE Offshore EdgeTech	39,000 USD
			Transpondedor omnidireccional 4370	Aluminio anodizado	Longitud: 29 cm Diámetro: 7 cm Peso: en el aire: 2 kg Peso en el agua: 0,8 kg	No reporta			Rango: 1000 m Frecuencia de interrogación: 15, 17 o 19 kHz Tiempo de ida y vuelta de la señal (transponder/responder): 15 ms/2 ms	Batería recargable NiCad de 1,0 A Incluye cargador					
USBL	GAPS-NG		Unidad GAPS Interfaz externa Cable principal	Carcasa en fibra de carbono con pintura epóxica	Altura: 63,7 cm Diámetro máx: 29,5 cm Peso en el aire: 16 kg Peso en el agua: 7 kg	No reporta	Sistema de posicionamiento inercial, acústico y GPS integrado . Compatible con transpondedores Sonardyne. Precalibrado, permite ser usado de manera inmediata sin la necesidad de configuración previa	Cuenta con sistema inercial para determinar la orientación y la altitud de la plataforma de control, con alta precisión.	Rango: 4000 m Profundidad máxima de operación: 25 m Presición : 0,2% del rango Covertura: 200° Frecuencia de operación: 22 - 30 kHz Temperatura de operación: -5° C - 35° C Temperatura de almacenamiento: -20° C - 70° C	Full Ethernet compatibility and enhanced connectivity (4 Ethernet + 4 serial I/O's)	El sistema tiene una carcasa que protege los sistemas internos de la corrosión , no necesita calibración previa o una inspección periodica.	Ficha Técnica. Cotización.		IXBLUE	260,273.97 USD
			Transpondedor MT912S-R	No reporta	Longitud: 37 cm Diámetro: 9,1 cm Peso: en el aire: 3,9 kg Peso en el agua: 2 kg	No reporta			Rango: 1000 m		No reporta				11,012.62 USD
															271,286.59 USD
USBL	Scout Plus		Unidad de interfaz y transceptor integrada Cables Transductor Transpondedor 7815 OBCT	No reporta	No reporta	No reporta	Sistema operativo Windows XP Compatible con diversos software de posicionamiento. Incluye software de calibración y calidad *CASIUS Calibration software*	Integrado a un sensor de alabeo, cabeceo y guiñada y a un compás magnético. Soporta todos los sistemas DPS	Rango de operación: 500 m Precisión: 2,75% del rango Señal de transmisión de alta frecuencia Número de objetivos posibles de rastreo: 6	Requiere la entrada de datos de GPS y de movimientos de alabeo, cabeceo y guiñada internos y de la embarcación.	No reporta	Brochure cotización		Sonardyne	46,311.56 USD

4.2. PÁGINAS AMARILLAS

Durante el proceso de búsqueda de alternativas comerciales se contactaron 11 empresas fabricantes o distribuidoras de sistemas de posicionamiento USBL. Con el fin de tener un registro de los datos de contacto se presentan los datos principales de las empresas que enviaron cotización, o en su defecto, el precio del producto y las condiciones de compra en la Matriz 4.2.1. En la Matriz 4.2.2 se lista las empresas que fueron contactadas, más no enviaron información sobre sus productos o solicitaron de información adicional para enviar una propuesta o cotización.

Dentro de la posibilidades comerciales, se hace referencia, en algunos casos, a los términos de negociación internacional INCOTERMS (*International Chamber of Commerce Trade Terms*). Los cuales permiten establecer los derechos y reponsabilidades en un contrato de compraventa internacional. Los dos INCOTERMS requeridos por algunas de las empresas solicitadas son:

- **EXW (Ex works) → En fábrica**
  Este INCOTERM establece que la compra se realiza en el punto de venta, siendo el comprador responsable de los gastos y riesgos del proceso de importación.
- **FOB (Free on board) → Libre a bordo**
  El INCOTERM FOB, hace responsable al vendedor sólo hasta el momento en que el producto sale del puerto convenido.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
GRUPO DE AUTOMATICA Y DISEÑO A+D.
PROYECTO: Programa estratégico para el desarrollo de tecnología robótica orientada a la exploración petrolera de los fondos marinos colombianos.

MATRIZ 4.2.1 PAGINAS AMARILLAS. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUATICO

Alternativa comercial	Fabricante	País de origen	Experiencia	Representante más cercano	Soporte técnico	Posibilidades comerciales	Tiempo de entrega	Garantía	Web	Persona de contacto	Idioma	Correo electrónico	Teléfono	Dirección	Observaciones
HiPAP 351P HPR 400P μPAP 201H cNODE transponders	Konsgberg Maritime	Noruega	Empresa con 200 años de experiencia en el desarrollo de sistemas de posicionamiento dinámico y navegación, automatización marina, gestión de seguridad, investigación y construcción subacuática, entre otras áreas.	Kongsberg Maritime do Brasil S.A.	No reporta	El pago se realiza 30 días después de la compra. Cuentan con sopote técnico las 24 horas del día durante toda la semana. No presentan ningún incomberiente con la entrega el producto en Colombia.	No reporta	1 año	http://www.km.kongsberg.com	Roar Hansen	Inglés	km.ams.rio@kongsberg.com	+ 55 21 2240 9402	Av. Rio Branco 173 - 12 andar BR-20040-007 Rio de Janeiro Brazil	
TrackLink 1500LC system	LinkQuest Inc.	Estados Unidos	Empresa líder en la fabricación de instrumentos acústicos de precisión para exploración, construcción, perforación y estudios en el campo petrolífero costafuera, estudios ambientales y otras aplicaciones oceanográficas.	Directamente con la empresa	support@link-quest.com	Se debe realizar la transferencia bancaria antes del envío. F.O.B. *(Free on Board)*, en San Diego, California, EE.UU	No reporta	1 año desde la fecha de compra	http://www.link-quest.com/	Ning	Inglés	sales@link-quest.com	(858) 623 9900 (858) 623 9919	6749 Top Gun Street San Diego, CA 92121 USA	
BATS - Desktop System BATS - Full Rack Mount System	EdgeTech	Estados Unidos	Empresa líder en fabricación de soluciones tecnológicas para aplicaciones subacuáticas. Conocida a nivel mundial por la alta calidad de sus productos, entre estos están sonares de barrido lateral, perfiladores del suelo marino, sistemas de batimetría, sonares para ROV y AUV, además de toda una línea de sensores acústicos como sistemas USBL, MRUs, transpondedores y sistemas de comunicación acústica para medias y altas profundidades.	No reporta	No reporta	Se debe realizar la transferencia bancaria antes del envío. EXW (Ex-works) West Wareham, MA, USA	30 a 45 días	No reporta	http://www.edgetech.com/	Mohammed Sanhaji	Inglés	Mohammed.Sanhaji@edgetech.com	+1 561 995 7767	1141 Holland Drive, Bay 1 Boca Raton, FL 33487	Tienen representante en Colombia llamado Carlos Alberto Andrade, trabaja en EXOCOL- Exploraciones Oceánicas de Colombia
GAPS-NG	IXBLUE	Reino Unido	Empresa con 30 años de experiencia en el mercado de la navegación, el posicionamiento y la proyección de imágenes. Reconocida por ser pionera en el desarrollo de la última tecnología de rendimiento en giróscopos de fibra óptica, en el procesamiento de señal acústica y señales de sonar, fusión de datos acústicos e inerciales. Es una empresa que se asegura de proveer productos de de alta precisión, desempeño y confiabilidad.	IXBLUE Brazil	No reporta	Se debe solicitar una licencia de exportación individual a las autoridades francesas.	No reporta	No reporta	http://www.ixblue.com	Jean Marc Binois	Inglés	jean-marc.binois@ixblue.com	+55 21 2588 8058	Avenida Rio Branco 1-12 andar 20090-003, Centro Rio de Janeiro	Viaja constantemente a Colombia, se puede organizar una cita.
USBL Scout	Sonardyne	Reino Unido	Empresa con 40 años de experiencia y un gran portafolio en tecnología acústica y no acústica para el sector marítimo más exigente. Es una empresa con alto conocimiento y experiencia en diseño, manufactura y análisis de soluciones marítimas según la necesidad del cliente	Sonardyne USA	No reporta	La Universidad Pontificia Bolivariana se hace responsable del envío e importación a Colombia. EXW (Ex-works) Blackbushe, UK.	No reporta	No reporta	http://www.sonardyne.com	André Moura	Inglés	usa.sales@sonardyne.com	+1 281 890 2120	8280 Willow Place Drive North, Suite 130, Houston, Texas 77070, USA	

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.			
GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D.			
PROYECTO: Programa estratégico para el desarrollo de tecnología robótica orientada a la exploración petrolera de los fondos marinos colombianos.			
MATRIZ 4.2.2 PROVEEDORES O DISTRIBUIDORES QUE NO ENVIARON INFORMACIÓN			
PROVEEDOR	**SISTEMA**	**FECHA DE CONSULTA**	**OBSERVACIONES**
EIVA	USBL Portable BATS (Broadband Acustic Tracking System) USBL: Benthos DAT	30 de junio de 2014	Solo tienen representación en Escandinavia. Para que EIVA pueda vender éste equipo en otras áreas geográficas, se requiere que los instrumentos formen parte de un sistema o subsistema integrado. Por lo tanto solicita mayor información.
Sonardyne	Scout USBL Prospector LBL LBL USBL LUSBL	26 de junio de 2014	
Benthos	USBL: Benthos DAT	1 de julio de 2014	
Seatronics	LBL USBL	1 de julio de 2014	Solicita mayor información
Evologics	underwater acoustic USBL systems S2CR 18/34 S2CR 48/78 S2CR 42/65	1 de julio de 2014	
Applied Acoustics	USBL Positioning beacons	1 de julio de 2014	

Las matrices contenidas en este capítulo también pueden encontrar en formato digital en el Anexo C.

5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA UN ROV

El proceso de selección de un sistema de posicionamiento subacuático debe buscar ser objetivo y coherente con los requerimientos y condiciones de operación. Por lo tanto, se definen 5 criterios básicos de selección que buscan evaluar de forma cuantitativa y cualitativa las diferentes alternativas comerciales, identificadas en el capítulo anterior. Para elegir una opción adecuada que pueda ser usada en un ROV en la fase de operación. Para el proceso de selección se contruye una matriz de decisión, donde se evalúan los diferentes criterios a partir de un peso que se asigna en función de la importancia considerada, sumando un total del 100%. Los criterios de selección establecidos para el proceso de decisión son los siguientes:

1. **Características técnicas:** este criterio tiene un peso del 20%. Se evaluarán características físicas como las dimensiones, el peso, el material de construcción y la compatibilidad con sensores y software externos. Se le asignará mayor puntuación a los sistemas más compactos y portables, que tengan protección a las salpicaduras y que estén fabricados con materiales apropiados para el ambiente de trabajo y que adicionalmente pueda ser integrado con sistemas inerciales y sistemas de navegación.
2. **Características de uso:** este criterio tiene un peso del 15%. Se le dará mayor puntaje a los sistemas que tengan un rango apropiado para la aplicación, es decir, que esté dentro de un rango de 1000 m y 1500 m. Los sistemas con mayor rango de operación serán bien calificados, pero se disminuirá un poco el puntaje por ser sistemas para aplicaciones a altas profundidades. Dentro de este criterio, también se evaluará con mayor puntuación los sistemas con bajo consumo de potencia y que cuenten con facilidad de soporte técnico y calidad en la documentación.
3. ***Core business* y experiencia de la empresa:** este criterio tiene un peso del 20%. Con él se busca evaluar la experiencia del fabricante en sistemas acústicos subacuáticos, con el fin de garantizar el soporte y la calidad del sistema. Las

empresas con mayor experiencia en el campo acústico pueden brindar mayores garantías y fiabilidad del usuario.

4. **Precisión:** este criterio tiene un peso del 15%. Aunque La precisión del sistema no es un factor determinante, se evalúa de forma independiente porque, actualmente, las condiciones de operación son inciertas y los sistemas de posicionamiento acústico se pueden ver afectados por condiciones ambientales, de operación, entre otras. Por lo tanto, un sistema de posicionamiento con mayor precisión garantiza menor generación de error durante la navegación.
5. **Costo:** este criterio tiene un peso del 30%. El costo es un criterio fundamental a la hora de seleccionar un sistema de posicionamiento dentro de un proyecto de investigación. La evaluación de este criterio se hará de forma cuatitativa, aplicando la ecuación empleada por Ramírez en [73].

$$C_i = 5\left(\frac{Costo_{min}}{Costo_i}\right)$$

donde C_i es la calificación asignada para cada instrumento, $Costo_{min}$ es el valor cotizado más económico y $Costo_i$ es el valor del sistema a evaluar.

Los costos presentados en la Matriz 4.1.1 están en dólares americanos (USD), sin embargo en algunas cotizaciones e información enviada por el fabricante, se tiene el valor del sistema en monedas diferentes, como coronas noruegas (NOK), libras esterlinas (GBP) y euros (EUR). Pero con el fin de comparar los valores y dar una calificación, se hizo la conversión a una sola moneda tomando como referente el USD. Para esto se trabaja con el valor de 1 NOK = 0.16 USD, 1 GBP = 1.697 USD y 1 EUR = 1,343 USD [74].

A continuación se presenta la matriz de decisión, donde se evalúan las diferentes alternativas comerciales. El rango de calificación es de 0 a 5, donde 0 equivale a que el sistema no cumple con el criterio y 5 indica que cumple con todas las condiciones evaluadas en dicho criterio.

GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D.

PROYECTO: Programa estratégico para el desarrollo de tecnología robótica orientada a la exploración petrolera de los fondos marinos colombianos.

MATRIZ 5.1 EVALUACIÓN. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

Critérios	Peso	HPR410P		HiPAP351P		µPAP 201H		TrackLink 1500LC		BATS - Full Rack Mount System		BATS - Desktop System		GAPS-NG		Scout Plus	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
Características técnicas	0,2	4	0,8	3,7	0,74	3,2	0,64	4,5	0,9	3,8	0,76	4,5	0,9	5	1	4	0,8
Características de uso	0,15	4	0,8	4	0,8	3,5	0,7	4	0,8	4,8	0,96	4,8	0,96	3,5	0,7	3,5	0,7
Core business y experiencia del fabricante	0,2	5	1	5	1	5	1	4	0,8	5	1	5	1	4,5	0,9	4,8	0,96
Precisión	0,15	0,5	0,1	3,3	0,66	2,2	0,44	0,2	0,04	2	0,4	2	0,4	5	1	0,4	0,08
Costo	0,3	1,3	0,26	0,6	0,12	1,1	0,22	5	1	2	0,4	2,3	0,46	0,3	0,06	1,9	0,38
TOTAL			2,96		3,32		3		3,54		3,52		3,72		3,66		2,92

Esta matriz también se puede encontrar en formato digital en el Anexo D.

Como resultado de la matriz de decisión, se determina que la alternativa comercial indicada para el posicionamiento del ROV, que se está desarrollando en el Grupo de Automática y Diseño A+D, es la alternativa comercial *BATS-Desktop Systema*, fabricada y distribuida por la empresa ORE Offshore EdgeTech, con un puntaje ponderado de 3.72. Esto se debe principalmente a que este sistema es un sistema portable, con características técnicas y de uso que se ajustan a la necesidad. Aunque no es el sistema de posicionamiento más económico (con un precio de 39,000 USD), cuenta con el respaldo de una empresa líder en el mercado y enfocada a soluciones oceanográficas para operaciones petroleras costa afuera.

El sistema que obtuvo más baja calificación fue el sistema Scout Plus, fabricado y distribuido por la empresa Sonardyne, con un puntaje ponderado de 2.92. Esto se debe a la falta de claridad en su información, a su bajo nivel de precisión y a su alto costo (46,315 USD).

La evaluación de los sistemas de posicionamiento se hizo de manera objetiva, basada en los datos, principalmente númericos, de las características de los sistemas. Para la evaluación del primer criterio se realizó una comparación entre las dimensiones, el peso en el aire y los datos indicados sobre características tecnológicas que tenían los diferentes sistemas. La evaluación del segundo criterio fue un poco más simple, dado que todos los sistemas cumplían con el rango de operación requerido, donde se bajó un poco el puntaje sólo si no estaba entre los 1000 m y 1500 m de operación, la evaluación de este criterio se basó principalmente en la calidad de la información que se tiene de los diferentes sistemas. La evaluación del tercer criterio es un poco más subjetiva que la de los demás, puesto que se basa principalmente en la información que se tiene de las diversas páginas web. Para la evaluación de cuarto y quinto criterio se empleó la fórmula matemática mencionada en la descripción del quinto criterio, sin embargo, en la evaluación de precisión no se usaron los datos económicos sino el dato de precisión indicados para cada sistema, donde el que mejor presición tiene es el GAPS-NG, con una presición de 0.2% del rango.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de los ROVs, de los DPS y de los diferentes sistemas de posicionamiento empleados para determinar la ubicación de los ROVs durante una misión de exploración. Estudio basado en diferentes fuentes bibliográficas, con el fin de proporcionar información amplia y concreta.

Mediante un proceso de búsqueda vía *web*, se identificaron diversos sistemas de posicionamiento comerciales y las empresas fabricantes y distribuidoras. Las cuales fueron contactadas con el fin de obtener información de los productos y de contacto, para facilitar el proceso de selección y compra en un futuro.

Se definieron los criterios de selección de los sistemas de posicionamiento, para evaluar las diferentes alternativas comerciales de manera objetiva, en función de las necesidades y requerimientos de operación del ROV.

Se seleccionó el sistema de posicionamiento BATS-Desktop system, fabricado por la empresa ORE Offshore EdgeTech. Este sistema es un sistema portable, de alta precisión y compatible con sistemas inerciales y GPS.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 2, pp. 11 – 45. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500062

[2] ——, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 1, pp. 1 – 10. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500050

[3] G. Antonelli and A. Leonessa, *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, 2nd ed., S.-V. Inc., Ed. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006.

[4] NORSOK, *NORSOK STANDARD U-102*, Norwegian Technology Centre Std., 2012, 2nd Ed. [Online]. Available: http://www.standard.no/petroleum

[5] F. A. Azis, M. S. M. Aras, M. Z. A. Rashid, M. N. Othman, and S. S. Abdullah, "Problem identification for underwater remotely operated vehicle (ROV): A case study," *Procedia Engineering*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026112

[6] T. Willatt, P. Matey-García, L. Ávila Sánchez, and L. Piras, "Colombia, a special report from oil and gas investor," Global Business Report, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: http://gbreports.com/admin/reports/Colombia_Oil&Gas2012.pdf

[7] E&P Forum and UNEP, *Enviromental management in oil and gas exploration and production.* Words and publications, 1997, ch. 2, pp. 4–10.

[8] E. de la Rosa. (2013, Octubre) Sondas batimétricas; cartografía submarina.

[Online]. Available: http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io7/public_html/index.html

[9] Agencia Nacional de Hidrocarburos, "Colombia: Petróleo y futuro," Agencia Nacional de Hidrocarburos, Tech. Rep., 2009.

[10] Ecopetrol. (2013, Octubre) El petróleo y su mundo. Ecopetrol. [Online]. Available: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/introduccion.htm

[11] Shell, "Oil and gas offshore exploration," Shell, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: http://www.shell.us/aboutshell/projects-locations/alaska/events-news/10152011-offshore101.html

[12] Petrotecnia, "La logística offshore de total austral," Petrotecnia, Tech. Rep., 2009.

[13] Oceaneering. (2013, Octubre) Main aplications. [Online]. Available: http://www.oceaneering.com/oceanmedia/rov/rovtutorial/index.html

[14] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 8, pp. 207 – 218. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500128

[15] D. J. Csepp, "ROV operation from a small boat," *Marine Technology Society Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 81–89, 2005. [Online]. Available: http://www.ingentaconnect.com/content/mts/mtsj/2005/00000039/00000002/art00010

[16] J. E. Manley, "New tools for ocean exploration, equipping the NOAA Ship Okeanos Explorer," in *OCEANS 2008*. Quebec City, QC: IEEE, 2008, pp. 1–5. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5151876

[17] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 12, pp. 256 – 278. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500165

[18] T. Salgado-Jimenez, J. L. Gonzalez-Lopez, J. C. Pedraza-Ortega, L. G.

Garcia-Valdovinos, L. F. Martinez-Soto, and P. A. Resendiz-Gonzalez, "Design of ROVs for the mexican power and oil industries," in *Proceedings of the 1st International Conference in Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, Montreal, QC, October 2010, pp. 1–8. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5624437&tag=1

[19] D. J. Wollmann, A. C. Santanna, L. Hsu, R. Costa, F. C. Lizarralde, F. B. Santanna, and J. P. V. S. D. Cunha, "Experimental parameter identification of an underwater remotely operated vehicle (ROV) thruster model," *Boletim técnico da Petrobras*, vol. 38, no. 1-2, pp. 31–45, 1995. [Online]. Available: http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3201469

[20] S. C. Pinheiro, C. E. Motta, P. L. Drews, and T. Garcia, "Underwater vehicle dynamic modeling," in *International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, MG, 2005.

[21] J. P. J. Avila and J. C. Adamowski, "Experimental evaluation of the hydrodynamic coefficients of a ROV through morison's equation," *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 17-18, pp. 2162 – 2170, 2011. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801811002265

[22] J. P. J. Avila, J. C. Adamowski, N. Maruyama, F. Takase, and M. Saito, "Modeling and identification of an open-frame underwater vehicle: The yaw motion dynamics," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 66, no. 1-2, pp. 37–56, 2012. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/s10846-011-9625-x

[23] J. P. Avila, D. C. Donha, and J. C. Adamowski, "Experimental model identification of open-frame underwater vehicles," *Ocean Engineering*, vol. 60, no. 0, pp. 81 – 94, 2013. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801812003836

[24] V. Kuhn, P. Drews, and S. Gomes, "Controlling a inspection ROV using low cost sensors," in *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA, 2012*, Campina Grande, September 2012.

[25] P. Drews-Jr, J. Longui, and V. Rosa, "Real-time depth estimation for underwater inspection using dual laser and camera," in

Symposium on Computing and Automation for Offshore Shipbuilding (NAVCOMP), Rio Grande, RS, Brazil, 2013. [Online]. Available: http://www.researchgate.net/publication/253703459_Real-time_Depth_Estimation_for_Underwater_Inspection_Using_Dual_Laser_and_Camera

[26] C. A. Marinho, C. Patusco, C. Camerini, L. Mesquita, R. W. dos Santos, S. Damasceno, and S. Morikawa, "Petrobras' developments in underwater inspection," in *18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, April 2012.

[27] L. B. Gutiérrez, C. A. Zuluaga, J. A. Ramírez, R. E. Vásquez, D. A. Flórez, E. A. Taborda, and R. A. Valencia, "Development of an underwater remotely operated vehicle (ROV) for surveillance and inspection of port facilities," in *ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vancouver, British Columbia, Canada, November 2010.

[28] D. Madero and J. J. Durán, "Diseño de un prototipo ROV (Remotely Operated Vehicle) subacuático experimental," Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, 2012.

[29] A. Molero, R. Dunia, J. Cappelletto, and G. Fernandez, "Model predictive control of remotely operated underwater vehicles," in *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011*, Orlando, FL, December 2011, pp. 2058–2063. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6161447

[30] M. A. Vásquez, "Desarrollo de un control electrónico para un submarino eléctrico experimental," Trabajo de grado, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Marzo 2011.

[31] J. Selkainaho, "Tuning a dynamic positioning system," *Automatica*, vol. 29, no. 4, pp. 865 – 875, 1993. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109893900928

[32] T. D. Nguyen, A. J. Sorensen, and S. T. Quek, "Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions," *Automatica*, vol. 43, no. 5, pp. 768 – 785, 2007. [Online]. Available:

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109807000301

[33] E. Tannuri, A. Agostinho, H. Morishita, and L. M. Jr, "Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 10, pp. 1121 – 1132, 2010. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066110001486

[34] A. J. Sorensen, "A survey of dynamic positioning control systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 35, no. 1, pp. 123 – 136, 2011. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578811000095

[35] IMCA, *Guidelines for The Design and Operation of Dynamically Positioned Vessels*, International Marine Contractors Association, www.imca-int.com, December 2007.

[36] J. M. de la Cruz, J. Aranda, and J. M. Girón, "Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 9, no. 3, pp. 205 – 218, 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791212000313

[37] R. Muñoz, "Control multivariable mediante técnicas QFT: Aplicaciones a sistemas navales," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2007.

[38] ABS, *Guide for Dynamic Positioning systems*, American Bureau of Shipping, November 2013.

[39] Kongsberg Maritime. (2013, December) IMO DP Classification. Kongsberg Maritime. [Online]. Available: http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/D9479D5DB35FCA01C1256A4C004A876E?OpenDocument

[40] The Nautical Institude. (2013, September) DP class notation. The Nautical Institude. [Online]. Available: http://www.nautinst.org/en/dynamic-positioning/what-is-dynamic-positioning/index.cfm

[41] Hornbeck Offshore Services. (2013, December) Offshore supply vessels, dynamic positioning. Hornbeck Offshore Services. [Online]. Available:

http://www.hornbeckoffshore.com/vessel_osv_dp.html

[42] J. Hespanha, D. Liberzon, and A. Morse, "Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching," *Systems & Control Letters*, vol. 49, no. 1, pp. 49 – 65, 2003. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167691102003420

[43] J. M. Villar, "Posicionamiento dinámico: Principios, características y operaciones," Master's thesis, Universidad de Cantabría, Octubre 2012.

[44] U. Hydra. (2014, February) Dynamic positioning (DP). Unique Hydra. [Online]. Available: http://www.hydra.co.za/products/marine-solutions/dynamic-positioning.html

[45] J. J. Usabiaga and R. González, "Sistema de posicionamiento dinámico (SPD) y operaciones offshore, incorporación de tecnologías avanzadas," *Buques y Equipos*, vol. -, pp. 75–79, 2011.

[46] C. F. Varela, "Sistema de posicionamiento y navegación satelital," *Revista de tecnología*, vol. 2, pp. 9–29, 2003.

[47] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. García-Alegre, L. García, D. Guinea, and F. Sandoval, "Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro," *ETS Ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Málaga*, vol. 1, p. 9, 2012.

[48] J. White and M. Lippis, "How a GPS works," Imagen, University of Colorado, 2003.

[49] M. K. Buhrke, "Surface positioning for DP operations," in *Dynamic Positioning Conference*, Houston, USA, October 1998, pp. 1–12.

[50] L. M. Knausgård, "Development of DP system for merlin WR200 ROV," Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2013.

[51] I. Tena, "A new ROV DP," in *Dynamic Positioning Conference*, Houston, USA, October 2007, pp. 1–6.

[52] J. R. Stanley, "The stationkeep function: Dynamic positioning for remotely operated vehicles," Remote Systems, Schilling Robotics, Tech. Rep., 2004.

[53] F. Dukan, M. Ludvigsen, and A. Sorensen, "Dynamic positioning system for a small size ROV with experimental results," in *OCEANS 2011, IEEE*, Santander, Spain, June 2011, pp. 1–10. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6003399&tag=1

[54] N. Bowditch, *The American Practical Navigator*, 9th ed., T. A. P. N. N. Imagery and M. Agency, Eds. National Imagery and Mapping Agency, 2002.

[55] C. D. Crane III and J. Duffy, *Kinematic analysis of robot manipulators*, 1st ed., C. U. Press, Ed. Cambridge University Press, 1998.

[56] C. E. LaPointe, "Virtual long base line (VLBL) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2006.

[57] M. Blain, S. Lemieux, and R. Houde, "Implementation of a ROV navigation system using acoustic Doppler sensors and Kalman filtering," in *Proceedings OCEANS 2003*, vol. 3, San Diego, CA, USA, September 2003, pp. 1255–260. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1282546

[58] Teledyne RD Instruments, *Doppler Velocity Log (DVL) Navigator Technical Manual*, Teledyne RD Instruments, February 2013.

[59] D. Rudolph and T. A. Wilson, "Doppler velocity log theory and preliminary considerations for design and construction," in *Proceedings of IEEE Southeastcon, 2012*. Orlando, FL: IEEE, March 2012, pp. 1 – 7. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6196918

[60] R. D. Christ and R. L. W. Sr., *The ROV Manual*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014, ch. 17, pp. 453 – 475. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982885000178

[61] L. Whitcomb, D. Yoerger, and H. Singh, "Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles," in *Robotics and Automation*, vol. 1, 1999, pp.

399 – 406. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=770011

[62] M. A. Vogt, "Multi-state beamforming array," U.S. Patent US8 254 208 B2, August Dec 8, 2008, 2012. [Online]. Available: http://www.google.com/patents/US8254208

[63] Tampere University of Technology, "Basic principles of inertial navigation," Seminar on inertial navigation systems, Julio 2014.

[64] VectorNav Technologies. (2014, Julio) Inertial measurement units and inertial navigation. VectorNav Technologies. [Online]. Available: http://www.vectornav.com/support/library?id=76

[65] D. Titterton, J. Weston, and I. of Electrical Engineers, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed., ser. IET radar, sonar, navigation, and avionics series 17, M. F. House, Ed. Institution of Engineering and Technology, January 2004. [Online]. Available: http://books.google.com.co/books?id=WwrCrn54n5cC

[66] L. Stutters, L. Honghai, C. Tiltman, and D. Brown, "Navigation technologies for autonomous underwater vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 38, no. 4, pp. 581–589, July 2008.

[67] R. D. Christ and R. L. W. Sr., *The ROV Manual*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014, ch. 16, pp. 425 – 451. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982885000166

[68] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, ser. Geophysical Sciences, Springer Praxis Books, Ed. Springer, 2010. [Online]. Available: http://books.google.com.co/books?id=PFXgLQAACAAJ

[69] K. Vickery, "Acoustic positioning systems: A practical overview of current systems," in *Dynamic Positioning Conference*. Sonardyne Inc., October 1998.

[70] Sonardyne. (2014, Julio) LBL all systems. [Online]. Available: http://www.sonardyne.com/products/positioning/lbl.html

[71] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 4, pp. 81 – 124. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500086

[72] Nautronix. (2014, Julio) Acoustic techniques. [Online]. Available: http://www.nautronix.com/acoustic-techniques.php#shortbaseline

[73] J. A. Ramírez, "Diseño mecánico de un vehículo sumergible operado remotamente," Master's thesis, Universidad Pontificia Bolivariana, 2007.

[74] XE. (2014, Julio) Xe currency converter. [Online]. Available: http://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=NOK&To=USD

ANEXOS

A. ARTÍCULO PUBLICABLE

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

Rafael E. Vásquez, PhD y Verónica Arango

rafael.vasquez@upb.edu.co, veronica.arangori@alfa.upb.edu.co

Resumen: Este artículo presenta un estudio de los vehículos operados remotamente (ROV, *Remotely Operated Vehicles*), de los sistemas de posicionamiento dinámico (DPS, *Dynamic Positioning System*) y de los diferentes sistemas de posicionamiento subacuático usados para la navegación de los ROVs. Esto, con el fin de realizar un proceso de selección de un sistema de posicionamiento de manera objetiva, definiendo criterios de selección claros, bajo los cuales se hace una evaluación de alternativas comerciales mediante una matriz de decisión. Como resultado de la matriz de decisión, se selecciona un sistema de posicionamiento acústico USBL, desarrollado por la empresa ORE Offshore EdgeTech, el cual cumple con las características necesarias para la operación de un ROV desde cualquier tipo de embarcación implementada como sede de control. *Copyright © 2014 UPB*

Palabras clave: Vehículo subacuático operado remotamente, sistema de posicionamiento, embarcación, posición, posicionamiento, navegación

Abstract: This paper gives a survey of remotely operated vehicles (ROV), dynamic positioning systems (DPS) and positioning systems used for underwater navigation. this is done aiming to do an objective selection of an underwater positioning system based on the definition of selection criteria. these criteria are utilized in a decision matrix to evaluate commercial alternatives of positioning systems.
As a result of the decision matrix, an ultra shortbaseline (USBL) acoustic positioning system, offered by the company ORE Offshore EdgeTech, which complies with the operational requirements to be controlled from a small boat was selected.

Keywords: Remotely operated vehicle, positioning system, vessel, position, positioning, navigation

2013-07-19, s2014-07-30

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana, se encuentra desarrollando actualmente el diseño de un vehículo subacuático operado remotamente (*Remotely Operated Vehicle*, ROV) que será empleado en la industria colombiana de petróleos para apoyar labores de exploración de los fondos marinos colombianos.

Al realizar exploraciones submarinas, el trabajo humano usualmente no supera los 180 m de profundidad, es por esto que cuando se requiere estudiar grandes profundidades es muy útil el uso de vehículos subacuáticos no tripulados [1]. El ROV que se está diseñando en el Grupo A+D, tiene como requerimiento básico alcanzar una profundidad operacional de 500 m. Para esto es necesario tener un cable umbilical que puede tener hasta 1 km de longitud. El cable es de gran importancia, debido a que éste es el medio de comunicación entre la superficie y el ROV, es decir, es el que permite enviar órdenes y recibir señales en la estación de control, y su necesidad está basada en la imposibilidad de transmisión de ondas electromagnéticas a través del agua.

Debido a las grandes profundidades a las cuales estará sometido el ROV y la gran longitud del cable, es necesario implementar un sistema de posicionamiento dinámico (DPS, *Dynamic Positioning System*) dentro del cual se pueda determinar la ubicación exacta del ROV respecto al barco, con el fin de lograr una operación conjunta de movimiento, entre el barco y el vehículo sumergible.

En la actualidad existe una gran variedad de sistemas de posicionamiento dinámico para ROVs. Para determinar el sistema de posicionamiento subacuático, que permita conocer la ubicación exacta del ROV y ser utilizado dentro del DPS, es necesario realizar un estudio de los sistemas de posicionamiento disponibles actualmente. Esto permitirá adquirir los fundamentos apropiados y establecer los criterios de selección necesarios para la adquisición del sistema de posicionamiento requerido en el DPS. El sistema de posicionamiento es fundamental para la operación del ROV desde el barco, donde se encuentra la estación de control, y ayudará a evitar posibles fallas en el ROV, en el cable umbilical o inclusive la pérdida del vehículo bajo el mar.

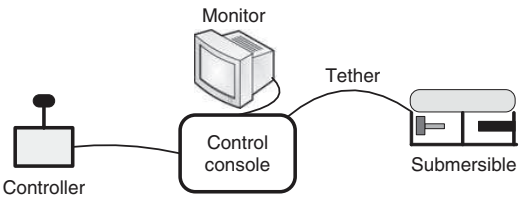
El objetivo de este artículo, es la selección del sistema de ubicación de un ROV para establecer continuamente la posición actual del vehículo cuando se encuentre en operación. Para lograrlo es necesario hacer un estudio de los ROVs, de los DPS, de los sitemas de posicionamiento y realizar el proceso de selección bajo los criterios de selección definidos en función de los requerimientos de operación del ROV.

2. VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE, ROV

Los vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV, *Remotely Operated Vehicles*) pertenecen a la familia de los vehículos subacuáticos no tripulados (UUV, *Unmanned Underwater Vehicles*). Los cuales se dividen en dos grupos, los vehículos subacuáticos autónomos (AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*) y los vehículos operados remotamente (ROV). La principal diferencia entre los ROV y los AUV, es la presencia o ausencia de un cable que permite comunicación directa entre el vehículo y la superficie [2]. Los ROV están operados directamente desde la plataforma de control, desde allí se envían órdenes y se reciben señales por medio de un cable umbilical [3], mientras que los AUV tienen comunicación directa con la superficie por medio de señales de radio frecuencia o a través de un módem acústico [2].

La norma NORSOK U-102 [4] establece que el término ROV esta definido como un equipo usado en el agua con la habilidad de observar sus alrededores y posicionarse de forma remota con la superficie a través de un cable. El sistema de un ROV está conformado por un vehículo subacuático conectado por medio de un cable umbilical a la superficie donde se encuentra la plataforma de control y los operadores, un sistema de manipulación para controlar la dinámica del cable, un sistema de lanzamiento y el suministro de potencia [5].En la Figura 1 se ilustran los componentes básicos de un ROV.

Figura 1. Componentes básicos de un sistema ROV [2].



Los ROVs se dividen en 3 clases diferentes [4].

- **Clase I⟶ Observación pura**
  Son vehículos pequeños equipados con video cámara, luces y propulsores, limitados físicamente a video observación, no pueden llevar acabo una tarea adicional sin modificaciones.
- **Clase II⟶ Observación con opción de carga útil**
  Los vehículos Clase II son vehículos con la capacidad de cargar sensores adicionales sin perder la función de video observación. Estos vehículos estan divididos, a su vez, en 2 clases, los vehículos Clase II A, que tienen la capacidad de cargar al menos dos sensores adicionales y los vehículos Clase II B, los cuales tienen la capacidad de realizar tareas de inspección, intervención y construcción ligera.
- **Clase III⟶ Vehículos de trabajo**
  Son vehículos grandes, con capacidad de cargar sensores adicionales o herramientas a través de marcos de elevación y grandes manipuladores. Tienen la capacidad de multiplexación, permitiendo a los sensores y herramientas operar sin ser cableados a través del sistema umbilical. Ésta clase de ROVs se divide en dos, los vehículos Clase III A, con potencia de operación menor a los 100 kW y capacidad de elevación menor a 2000 kg y los vehículos Clase III B, con potencia de operación mayor a 100 kW y capacidad de elevación mayor a 2000 kg.

Actualmente, los ROVs se han convertido en una herramienta necesaria para apoyar procesos de exploración subacuática. Lo que se debe, en gran parte, a la expansión de la industria petrolífera hacia zonas marítimas en busca de prospectos petrolíferos. Algunas aplicaciones que han convertido a los ROVs en herramientas indispensables son [6]:

- La realización de tareas de inspección visual de las plataformas petroleras, verificar la correcta instalación, monitorear el efecto de la corrosión y localizar grietas.
- Realizar estudios de contaminación biológica, tomar muestras de agua y de suelo, localizar objetivos en el fondo del mar y otras pruebas de medición y muestreo.
- Seguir ductos subacuáticos de transporte de hidrocarburos, revisar la presencia de fugas, verificar el estado de los ductos y asegurar la correcta instalación de estos.
- Realizar estudios acústicos y visuales necesarios para realizar instalaciones *offshore*.

Las aplicaciones principales de los ROVs, requieren de alta precisión y control. Por lo tanto, para asegurar el éxito de una misión de exploración, la embarcación de control en superficie, debe estar protegida contra la humedad, contra los cambios climáticos y debe tener la capacidad de mantener la posición, ya sea mediante un DPS o un sistema de posicionamiento amarrado (PM, *Positiong Mooring*). Adicionalmente, debe conocer en todo momento, el estado de las variables ambientales, la posición y la velocidad del barco y del ROV [7, 8, 9].

3. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO

Un sistema de posicionamiento dinámico (DPS, *Dynamic Positioning System*), está definido como un conjunto de componentes que permiten controlar la posición y el rumbo de un vehículo acuático mediante la acción de propulsores para seguir una trayectoria preestablecida o mantener una posición fija [10, 11, 12, 13, 14].

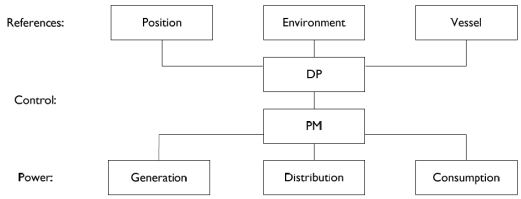
Los DPS se clasifican en función del nivel de redundacia incorporada en el sistema [14, 15, 16]. A continuación se hace una breve descripción de los diferentes DPS definidos por la ABS (*American Bureau of Shipping*) [15].

- **DPS-0**
  Es un sistema sin redundancia. Aplica para embarcaciones equipadas con un control de posición manual centralizado y un sistema de control automático de rumbo.
- **DPS-1**
  Es un sistema con bajo nivel de redundancia. Equipado para mantener la posición y el rumbo automáticamente bajo máximas condiciones ambientales y adicionalmente, cuenta con un sistema de control de posición manual.
- **DPS-2**
  Sistema de posicionamiento dinámico que tiene la capacidad de mantener la posición y el rumbo automáticamente dentro de un área específica y bajo condiciones ambientales máximas, durante y después de una falla en el sistema.
- **DPS-3**
  Sistema de posicionamiento dinámico que tiene la capacidad de mantener la posición y el rumbo automáticamente dentro de un área específica y bajo condiciones ambienta-

les máximas, durante y después de una falla en el sistema, incluyendo la pérdida de uno o varios compartimentos a causa de una inundación o un incendio.

Un DPS comprende todo el equipo que afecta directa e indirectamente la habilidad de una embarcación a mantener su posición, abarcando 3 áreas importantes: potencia, control y referencias. La potencia se divide en generación, distribución y consumo (sistemas de propulsión). El control se refiere al manejo del sistema de potencia y de control de posición (manual o automática). Las referencias, son todos los sensores que miden la posición, las condiciones ambientales y la actitud de la embarcación [14]. En la Figura 2 se observa los componentes básicos de un DPS y cómo se relacionan entre sí.

Figura 2. Componentes básicos de un DPS [14].



- **Sistema de potencia**
  comprende todas las unidades necesarias para proporcionar energía al DPS[13]. Compuesto por los motores primarios y generadores, el sistema de distribución (*switchboards*), los transformadores, los variadores de velocidad y un sistema de alimentación ininterrumpida [13, 15].
- **Sistema de propulsores**
  Es el conjunto de actuadores y propulsores encargados de mantener la embarcación en una posición fija o trasladarla en dirección longitudinal (*surge*), transversal (*sway*) y de guiñada (*yaw*) de forma independiente, proporcionando la fuerza de empuje y el movimiento de la embarcación [10, 13]
- **Sistema de control del DPS**
  El sistema de control comprende el hardware y el software necesario para posicionar la embarcación dinámicamente en un punto fijo [15]. Se encarga de calcular y convertir en señales de control las fuerzas que deben ejercer los propulsores para mantener la embarcación en una ubicación establecida y se oriente hacia donde sean mínimas las fuerzas de deriva [10, 17]
- **Sistema de referencia de posición**
  El sistema de referencia de posición (PRS, *Position reference system*) es el sistema que permite conocer la posición de la embarcación respecto a sus puntos de referencia [18]. Este sistema consiste en sensores de posición que en combinación con los sensores de viento, de movimiento y de orientación proveen información, al controlador del DPS, que puede afectar la posición de la embarcación [19].
- **Sensores**
  El sistema de sensores está constituido por todos los dispositivos de medida de orientación, de posición, de la velocidad, dirección del viento, entre otros. Para determinar el estado de las variables que afectan el control de la embarcación [15].

Para la operación de ROVs, se han desarrollado diversos DPS que consisten en un sistema de control computarizado, que tiene la capacidad de mantener automáticamente la posición y orientación del ROV mediante la acción de sus propulsores [20].

Los DPS son usados en ROVs, generalmente para mantener una posición fija o para maniobras a baja velocidad, automatizando el proceso de control [20]. Lo que facilita las diversas tareas que debe realizar el operador para maniobrar el vehículo, aumentando la eficacia y eficiencia de la operación, de tal forma que operadores jóvenes puedan pilotar el ROV con la misma destreza que un operador experimentado [20, 21, 22].

En 2004, Stanley desarrolló junto con la empresa Schilling Robotics un sistema de control avanzado que provee posicionamiento dinámico para ROVs, denominado StationKeep^{TM}. Éste sistema ofrece un modo de control automático y un modo de operación de desplazamiento. El primero, permite al vehículo asumir el control de vuelo, manteniendo su posición y orientación. En el segundo modo de control, el piloto sólo debe ingresar los datos de trayectoria y el sistema de control traslada el ROV automáticamente en la dirección deseada [22].

En 2007, Ioseba Tena introduce el SeeTrack Offshore, un DPS que permite reducir costos de entrenamiento y operación automatizando el proceso de control del ROV. Este sistema es una plataforma de control intuitiva a los movimientos que debe realizar el ROV dependiendo de la misión, permitiéndole al piloto concentrarse en tareas adicionales a la navegación.

En 2011, Dukan et al. [23] presentaron un DPS para ROVs implementando CompactRIO de *National Instruments* programado con Labview®. El DPS tiene una arquitectura de control por bloques de procesamiento con observador para filtrar la estimación de estado del ROV. Este DPS permite establecer diversos modos automáticos de control, buscando que el piloto pueda enfocarse en tareas que requieren una mayor intervención o toma de decisiones para facilitar y disminuir el tiempo de operación [23].

En 2012 las empresas Sonardyne International Ltda y Oceaneering International Inc. desarrollaron un sistema de pilotaje por cable (*Fly-By-Wire*) para el control de ROVs a cualquier profundidad. Este sistema permite mantener la posición de forma indefinida y navegar en tiempo y coordenadas reales automáticamente.

Todos los DPS para ROVs descritos anteriormente presentan una solución para mejorar y facilitar el mantenimiento en posición y la navegación de los ROVs. Cuentan con diversos sistemas de posicionamiento como sensores de velocidad DVL, sistemas inerciales o sistemas acústicos para determinar la posición del vehículo en todo momento, proporcionando precisión y confiabilidad en la operación del ROV.

4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

Para la navegación marítima subacuática existen sistemas de posicionamiento que se diferencian según la técnica de navegación implementada. Las tres técnicas principales de navegación son: navegación estimada y navegación inercial, navegación geofísica y navegación acústica [24]. En esta sección se describe en qué consiste cada una de estas técnicas.

4.1. Navegación estimada y navegación inercial

La navegación estimada (DR, *Dead Reckoning*) y la navegación inercial (INS, *Inercial navigation system*) están clasificadas en una misma categoría porque en ambas técnicas, se ingresan los datos de posición y velocidad iniciales del vehículo y a partir de estos y de los obtenidos por los sensores internos, se calcula la nueva posición [25, 24]. La desventaja de estas técnicas de navegación es el error de estimación que aumenta con el tiempo. Si el sistema no es reinicializado, el error de

estimación de posición se acumula con cada proceso de cálculo durante la trayectoria del vehículo [25, 24].

- **Navegación estimada**

  La navegación estimada consiste en integrar la velocidad del vehículo respecto al tiempo para conocer su trayectoria [24].

  Los sensores que se encargan de medir la velocidad del ROV de forma precisa son los DVL (*Doppler Velocity Log*), que miden la velocidad relativa al suelo marino o a una columna de agua [24].

  Los DVL constan de un transductor doppler con 4 emisores de señal de radio orientados hacia abajo y separados 30° de los ejes verticales del dispositivo.

  El principio de funcionamiento de un DVL consiste en la emisión de señales acústicas oscilatorias a lo largo de cada uno de los emisores, luego, por desplazamiento doppler se mide la frecuencia del eco en cada uno de ellos, que es proporcional a la velocidad del suelo marino.

  Los DVL son sensores empleados en vehículos que trabajan en las cercanias del suelo marino, con frecuencias de operación de 75 kHz en el extremo de baja frecuencia y 1.2 MHz en el extremo de alta frecuencia, entre más alta la frecuencia más cerca del fondo debe estar el vehículo, buscando garantizar que el instrumento esté en "Bloqueo de fondo", es decir, que los 4 emisores de señal tienen líneas de visión sobre el fondo del mar, con el fin de determinar con precisión la velocidad en los tres ejes coordenados [26, 27].

- **Sistemas de Navegación Inercial (INS)**

  Los sistemas de navegación inercial (INS, *Inertial Navigation System*) son sistemas con la capacidad de calcular la posición relativa respecto a un punto de referencia o a coordenadas absolutas sin necesidad de una fuente externa de posicionamiento [27, 28]. Al igual que los DVL, en los INS se ingresan los datos iniciales de posición y velocidad y a partir de estos el INS calcula los datos de posición y velocidad siguientes, integrando la información enviada desde la unidad de medición inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) [28].

  Los INS son sistemas compuestos por diversos dispositivos, entre ellos el más importante es la IMU, la cual está constituida por 3 acelerómetros ortogonales y 3 giróscopos ortogonales que proporcionan una medición tridimensional de las aceleraciones lineales y de la velocidad angular [29]. Los otros dispositivos son componentes electrónicos y computadores de navegación, que se encargan de calcular la aceleración gravitacional y de realizar las operaciones matemáticas necesarias para estimar la posición, velocidad lineal y orientación del ROV [29]

4.2. Navegación geofísica

La navegación geofísica es una técnica de navegación que consiste en la medición y observación de parámetros y características físicas del terreno, que son comparadas con un mapa previo del lugar de operación o con uno generado durante la misión, mediante mapeo o localización simultánea, con el fin de obtener una posición estimada del ROV [24, 30].

Lo que ha llevado a los investigadores a estudiar las técnicas de navegación geofísica ha sido, principalmente, obtener una alta precisión de navegación subacuática sin necesidad de una red acústica externa [24]. Sin embargo, el éxito de la navegación geofísica depende de las características del terreno. Éstas deben ser adecuadas para que el sistema pueda extraer paramétros útiles a partir de los datos obtenidos del sensor [30].

4.3. Navegación acústica

Los sistemas de navegación acústica constan de una red de transmisores y receptores de sonido, que permiten conocer la ubicación de un vehículo subacuático mediante el principio de triangulación, en base a la distancia existente entre el conjunto de transmisores externos y el receptor instalado en el ROV [24].

Dependiendo del arreglo geométrico que existe entre transmisores y receptores se define el sistema de posicionamiento acústico. Existen tres arreglos geométricos básicos que se diferencian en la distancia existente entre los transmisores externos. Los tres sistemas de posicionamiento acústicos principales son los LBL (*Long Baseline*), SBL (*Short Baseline*) y USBL (*Ultrashort Baseline*) [31, 24].

- **Long baseline (LBL)**

  Los sistemas LBL constan de una red de transpondedores instalados en el suelo marino, calibrados generalmente para navegar dentro de un marco de referencia global. Se emplean entre 3 y 12 transpondedores para generar una red acústica de navegación robusta y amplia, separados entre sí por una distacia que varía entre los 100 m y los 6000 m [24].

  El posicionamiento de un ROV a través de un sistema LBL consiste en la emisión de una señal acústica desde el transductor o interrogador, instalado en el ROV. La señal acústica es detectada por la red de transpondedores y estos envían una señal de respuesta al interrogador. En función del tiempo que transcurre entre la emisión de la señal de interrogación, hasta que se recibe respuesta del transpondedor, y conociendo la velocidad del sonido en el agua, se calcula la distancia que hay entre el ROV y los transpondedores, estimando la posición del vehículo mediante el pricipio de triangulación [31].

  Aunque este sistema cuenta con alta precisión y no tiene restricción de profundidad. Son sistemas que requieren una gran cantidad de componentes para la instalación y es necesario realizar un proceso previo de localización de los transpondedores en el fondo marino [31].

- **Short baseline (SBL)**

  Los sistemas SBL constan de un transpondedor instalado en el ROV que se comunica con una red de transmisores/receptores (transductores) y receptores (hidrófonos). Los cuales, están ubicados especialmente en el fondo de la plataforma de control bajo un sistema de referencia conocido y separados unos de otros una distancia que varía entre 10 m y 20 m.

  La red acústica instalada en la plataforma de control está compuesta, generalmente, por uno o dos transductores y varios hidrófonos. Por lo tanto, sólo el transmisor envía la señal interrogante al transpondedor, pero todos los dispositivos de la red detectan la señal de respuesta. De este modo, se obtiene el tiempo de ida y vuelta de la señal, entre el transductor y el transpondedor y una diferencia entre el tiempo de llegada de la señal a los diferentes receptores. El tiempo de ida y vuelta, permite calcular el rango entre el transpondedor y el transductor y la diferencia entre los tiempos de llegada de la señal, permite determinar la orientación del transpondedor desde

la embarcación. Obteniendo la posición del ROV relativa a la plataforma de control, donde está instalada la red de receptores [31, 32].

El sistema SBL cuenta con una configuración simple, que no requiere la instalación de transpondedores a lo largo del suelo marino. Sin embargo, estos sistemas no son de alta precisión cuando son instalados en plataformas de control pequeñas, debido a que la distancia entre los transductores e hidrófonos no es lo suficientemente amplia para que se dé con precisión el principio de triangulación, cuando se trabaja en una zona muy alejada de la estación en superficie [31, 32].

- **Ultrashort baseline (USBL)**

Los sistemas USBL, constan de un transpondedor instalado en el ROV, el cual se comunica mediante señales acústicas con una red de transductores, todos ensamblados en un mismo dispositivo, fijo a la plataforma de control, denominado transceptor [24, 31].

Los sistemas USBL calculan la posición de un ROV en base al rango y a la orientación del vehículo. El rango se calcula con el tiempo de ida y vuelta de la señal acústica. Mientras que la orientación, se calcula midiendo la diferencia del tiempo de fase de las señales sinusoidales recibidas por cada transductor. Dado que los transductores tienen una posición y orientación específica, la diferencia en el tiempo de fase, entre las señales recibidas, permite calcular mecánicamente el ángulo de incidencia de la señal. El cual es usado para calcular la orientación del transpondedor respecto al transceptor [24, 31].

La principal ventaja de los sistemas USBL es que no requiere una gran cantidad de componentes para su instalación y configuración, sólo requiere la estación de operación y el transceptor, que pueden ser instalados en todo tipo de plataforma de control y el transpondedor que va instalado en el ROV [24, 31, 32]. Adicionalmente, al estar la red de transductores ensamblada en un mismo transceptor, que está ubicado en una posición determinada dentro de la embarcación, permite que el sistema de referencia sea el mismo para la embarcación, para el transceptor y para el ROV, siempre y cuando se cuente con sensores de posicionamiento inercial y de GPS para compensar los posibles errores generados por condiciones ambientales externas [31].

5. SELECCIÓN DE UN SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SUBACUÁTICO

Después del estudio de los diferentes sistemas de posicionamiento subacuático y teniendo en cuenta que el ROV, que está siendo desarrollado por el Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana, tiene como requerimiento básico alcanzar una profundidad operacional de 500 m y que no cuenta una embarcación especial para su operación. El sistema de posicionamiento acústico USBL es el que mejor se adapta, por la facilidad de instalación y la poca complejidad de sus componentes. Adicionalmente, después de una búsqueda vía *web* se encontraron diversas opciones comerciales de sistemas de posicionamiento USBL portables, característica indispensable cuando es incierta la embarcación que será usada como plataforma de control.

Se encontraron 8 alternativcas comerciales para los sistemas USBL que cumplen con los dos requerimientos básicos de operación. Estas fueron evaluadas en función de 5 criterios de selección, definidos para elegir objetivamente la alternativa que mejor se adapta a los requerimientos. Los 5 criterios de selección son:

- **Características técnicas:** criterio con un peso del 20%. Se evaluarón las características físicas como las dimensiones, el peso, el material de construcción y la compatibilidad con sensores y software externos.
- **Características de uso:** criterio con un peso del 15%. Dentro de este criterio, se evaluó el rango, el consumo de potencia, facilidad de soporte técnico y calidad en la documentación.
- ***Core business* y experiencia de la empresa:** criterio con un peso del 20%. Se evaluó la experiencia del fabricante en sistemas acústicos subacuáticos, con el fin de garantizar el soporte y la calidad del sistema.
- **Precisión:** criterio con un peso del 15%. Se evaluó de forma independiente, porque un sistema de posicionamiento con mayor precisión garantiza menor generación de error durante la navegación frente a diversas condiciones ambientales que pueden afectar el funcionamiento del sistema.
- **Costo:** criterio con un peso del 30%. La evaluación de este criterio se hizo teniendo en cuenta que el sistema con mayor puntuación era el sistema más económico.

La evaluación de las alternativas comerciales se hizo con la construcción de una matriz de decisión, dónde se evaluaron las diferentes alternativas en un rango de 0 a 5, dónde 0 es que no cumple con el criterio y 5 es que cumple con todas las condiciones evaluadas en dicho criterio. En la Tabla1 se muestra el esquema de la matriz de decisión realizada para la selección de un sistema de posicionamiento USBL.

Como resultado de la matriz de decisión, se determinó que la alternativa comercial indicada para el posicionamiento del ROV, es la alternativa comercial *BATS-Desktop Systema*, fabricada y distribuida por la empresa ORE Offshore EdgeTech, con un puntaje ponderado de 3.72. Esto se debe principalmente a que este sistema es un sistema portable, con características técnicas y de uso que se ajustan a la necesidad. Aunque no es el sistema de posicionamiento más económico (con un precio de 39,000 USD), cuenta con el respaldo de una empresa líder en el mercado y enfocada a soluciones oceanográficas para operaciones petroleras costa afuera. En la Figura 3 se observa la imagen del sistema USBL seleccionado.

Figura 3. BATS-Desktop System [33].

6. CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio de los ROVs, de los DPS y de los diferentes sistemas de posicionamiento empleados para determinar la ubicación de los ROVs durante una misión de exploración. Estudio basado en diferentes fuentes de información, con el fin de proporcionar información amplia y concreta.
- Se definieron los criterios de selección de los sistemas de posicionamiento, para evaluar las diferentes alternativas comerciales de manera objetiva, en función de las necesidades y requeriemientos de operación del ROV.
- Se seleccionó el sistema de posicionamiento BATS-Desktop system, fabricado por la empresa ORE Offshore EdgeTech. Este sistema es un sistema portable, de alta precisión y que se ajusta a los requerimientos de operación del ROV que está siendo desarrollado por el Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla 1. Matriz de decisión para selección de un sistema de posicionamiento acústico

Critérios	Peso	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4		Alternativa 5	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
Características técnicas	0,2										
Características de uso	0,15										
Core business y experiencia del fabricante	0,2										
Precisión	0,15										
Costo	0,3										
TOTAL	1										

REFERENCIAS

[1] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 2, pp. 11 – 45. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500062

[2] ——, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 1, pp. 1 – 10. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500050

[3] G. Antonelli and A. Leonessa, *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, 2nd ed., S.-V. Inc., Ed. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006.

[4] NORSOK, *NORSOK STANDARD U-102*, Norwegian Technology Centre Std., 2012, 2nd Ed. [Online]. Available: http://www.standard.no/petroleum

[5] F. A. Azis, M. S. M. Aras, M. Z. A. Rashid, M. N. Othman, and S. S. Abdullah, "Problem identification for underwater remotely operated vehicle (ROV): A case study," *Procedia Engineering*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026112

[6] Oceaneering. (2013, Octubre) Main aplications. [Online]. Available: http://www.oceaneering.com/oceanmedia/rov/rovtutorial/index.html

[7] D. J. Csepp, "ROV operation from a small boat," *Marine Technology Society Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 81–89, 2005. [Online]. Available: http://www.ingentaconnect.com/content/mts/mtsj/2005/00000039/00000002/art00010

[8] J. E. Manley, "New tools for ocean exploration, equipping the NOAA Ship Okeanos Explorer," in *OCEANS 2008*. Quebec City, QC: IEEE, 2008, pp. 1–5. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5151876

[9] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*, 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. 12, pp. 256 – 278. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500165

[10] J. Selkainaho, "Tuning a dynamic positioning system," *Automatica*, vol. 29, no. 4, pp. 865 – 875, 1993. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109893900928

[11] T. D. Nguyen, A. J. Sorensen, and S. T. Quek, "Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions," *Automatica*, vol. 43, no. 5, pp. 768 – 785, 2007. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109807000301

[12] E. Tannuri, A. Agostinho, H. Morishita, and L. M. Jr, "Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 10, pp. 1121 – 1132, 2010. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066110001486

[13] A. J. Sorensen, "A survey of dynamic positioning control systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 35, no. 1, pp. 123 – 136, 2011. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578811000095

[14] IMCA, *Guidelines for The Design and Operation of Dynamically Positioned Vessels*, International Marine Contractors Association, www.imca-int.com, December 2007.

[15] ABS, *Guide for Dynamic Positioning systems*, American Bureau of Shipping, November 2013.

[16] Kongsberg Maritime. (2013, December) IMO DP Classification. Kongsberg Maritime. [Online]. Available: http://www.km.kongsberg.com

[17] J. M. de la Cruz, J. Aranda, and J. M. Girón, "Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 9, no. 3, pp. 205 – 218, 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791212000313

[18] J. M. Villar, "Posicionamiento dinámico: Principios, características y operaciones," Master's thesis, Universidad de Cantabría, Octubre 2012.

[19] U. Hydra. (2014, February) Dynamic positioning (DP). Unique Hydra. [Online]. Available: http://www.hydra.co.za/products/marine-solutions/dynamic-positioning.html

[20] L. M. Knausgård, "Development of DP system for merlin WR200 ROV," Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2013.

[21] I. Tena, "A new ROV DP," in *Dynamic Positioning Conference*, Houston, USA, October 2007, pp. 1–6.

[22] J. R. Stanley, "The stationkeep function: Dynamic positioning for remotely operated vehicles," Remote Systems, Schilling Robotics, Tech. Rep., 2004.

[23] F. Dukan, M. Ludvigsen, and A. Sorensen, "Dynamic positioning system for a small size ROV with experimental results," in *OCEANS 2011, IEEE*, Santander, Spain, June 2011, pp. 1–10. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6003399&tag=1

[24] C. E. LaPointe, "Virtual long base line (VLBL) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2006.

[25] N. Bowditch, *The American Practical Navigator*, 9th ed., T. A. P. N. N. Imagery and M. Agency, Eds. National Imagery and Mapping Agency, 2002.

[26] D. Rudolph and T. A. Wilson, "Doppler velocity log theory and preliminary considerations for design and construction," in *Proceedings of IEEE Southeastcon, 2012*. Orlando, FL: IEEE, March 2012, pp. 1 – 7. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6196918

[27] R. D. Christ and R. L. W. Sr., *The ROV Manual*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014, ch. 17, pp. 453 – 475. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982885000178

[28] Tampere University of Technology, "Basic principles of inertial navigation," Seminar on inertial navigation systems, Julio 2014.

[29] VectorNav Technologies. (2014, Julio) Inertial measurement units and inertial navigation. VectorNav Technologies. [Online]. Available: http://www.vectornav.com/support/library?id=76

[30] L. Stutters, L. Honghai, C. Tiltman, and D. Brown, "Navigation technologies for autonomous underwater vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 38, no. 4, pp. 581–589, July 2008.

[31] R. D. Christ and R. L. W. Sr., *The ROV Manual*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014, ch. 16, pp. 425 – 451. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080982885000166

[32] Nautronix. (2014, Julio) Acoustic techniques. [Online]. Available: http://www.nautronix.com/acoustic-techniques.php#shortbaseline

[33] ORE Offshore EdgeTech, "BATS-desktop system," Imagen, Julio 2014.

B. ANTEPROYECTO

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

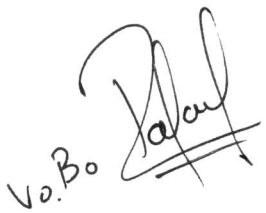
VERÓNICA ARANGO RIVERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2013

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

VERÓNICA ARANGO RIVERA

Anteproyecto de trabajo de grado



Director
RAFAEL E. VÁSQUEZ
Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2013

CONTENIDO

Pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 7

2. JUSTIFICACIÓN 9

3. OBJETIVOS 10

3.1. Objetivo general 10

3.2. Objetivos específicos 10

4. MARCO TEÓRICO 11

4.1. ¿Qué es un ROV? 11

4.2. Clasificación de los ROVs 12

4.3. Sistemas de Posicionamiento dinámico (DPS) 14

4.4. Sistemas de ubicación de ROVs 15

5. METODOLOGÍA 17

6. RECURSOS 19

6.1. Recursos humanos 19

6.2. Institucionales 19

7. PRESUPUESTO 20

8. CRONOGRAMA 21

9. PRODUCTOS ESPERADOS 22

10. IMPACTO AMBIENTAL 23

BIBLIOGRAFÍA 24

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1 Componentes básicos de un sistema ROV 12

2 Clasificación de los vehículos subacuáticos 13

3 DPS de un sistema marítimo 15

4 Sistemas de ubicación para vehículos subacuáticos en diferentes aplicaciones marítimas 16

5 Metodología 18

LISTA DE TABLAS

Pág.

1 Presupuesto 20

2 Cronograma 21

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria petrolífera, son muy usados los vehículos subacuáticos no tripulados (UUV, por sus siglas en inglés) para la exploración y explotación submarina. Estos vehículos se dividen en dos grupos, los vehículos subacuáticos autónomos (AUVs, por sus siglas en inglés) y los vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV, por sus siglas en inglés). La principal diferencia entre estos dos tipos de vehículos subacuáticos no tripulados, es que los ROVs deben estar conectados por medio de un cable umbilical a la superficie, donde se encuentra la estación de control [1].

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana, se encuentra desarrollando actualmente el diseño de un ROV que será empleado en la industria colombiana de petróleos para exploración submarina.

Al realizar exploraciones submarinas, el trabajo humano usualmente no supera los 180 m de profundidad, es por esto que cuando se requiere estudiar grandes profundidades es muy útil el uso de vehículos subacuáticos no tripulados [2]. El ROV que se está diseñando en el Grupo A+D, tiene como requerimiento básico alcanzar una profundidad operacional de 500 m. Para esto es necesario tener un cable umbilical que puede tener hasta 1 km de longitud. El cable es de gran importancia, debido a que éste es el medio de comunicación entre la superficie y el ROV, es decir, es el que permite enviar órdenes y recibir señales en la estación de control, y su necesidad está basada en la imposibilidad de transmisión de ondas electromagnéticas a través del agua.

Debido a las grandes profundidades a las cuales estará sometido el ROV y la gran longitud del cable, es necesario implementar un sistema de posicionamiento dinámico (DPS) que permita determinar la ubicación exacta del ROV respecto al barco, con el fin de lograr una operación conjunta de movimiento, entre el barco y el vehículo sumergible.

En la actualidad existe una gran variedad de sistemas de posicionamiento dinámico para ROVs. Con el fin de determinar cuál es el sistema de ubicación del ROV más

apropiado para ser utilizado dentro del DPS, es necesario realizar un estudio completo de los sistemas de posicionamiento disponibles actualmente. Esto permitirá adquirir los fundamentos apropiados y establecer los criterios de selección necesarios para la adquisición de los equipos requeridos en el DPS. Este sistema de posicionamiento es fundamental para la operación del ROV desde el barco, donde se encuentra la estación de control, y ayudará a evitar posibles fallas en el ROV, en el cable umbilical o inclusive la pérdida del vehículo bajo el mar.

La problemática principal que se abordará en este proyecto, es la selección del sistema de ubicación de un ROV para establecer continuamente la posición actual del vehículo cuando se encuentre en operación. Para lograrlo es necesario hacer un estudio de los DPS disponibles actualmente, establecer sus criterios de selección y en función de estos determinar el sistema de ubicación que será instalado en el ROV y hará parte escencial del DPS.

2. JUSTIFICACIÓN

Para el proyecto de diseño de un ROV para exploración petrolera es indispensable seleccionar un sistema de ubicación del ROV, el cuál permite determinar la ubicación exacta del vehículo respecto al barco, lugar donde se encuentra la estación de control.

Establecer la ubicación exacta del ROV en tiempo real respecto al barco es esencial para el manejo de éste, pues permite realizar una operación conjunta de movimiento entre el barco y el vehículo subacuático. Esto facilita el manejo del cable umbilical y previene posibles fallas. Adicionalmente, evita que el ROV tome un rumbo desconocido en mar abierto ocasionando su pérdida.

La presencia del sistema de ubicación en el ROV puede llegar a disminuir costos de mantenimiento y operación, debido a sus funciones principales. Al facilitar el manejo del cable umbilical, evita que éste falle, proporcionando una operación confiable durante un largo período de tiempo; y al determinar la posición exacta del ROV se puede realizar una exploración más efectiva, delimitando el lugar de exploración y aportando la ubicación exacta del objeto de búsqueda.

Este trabajo de grado está enmarcado dentro del Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, proyecto 1210-531-30550 (Convocatoria COLCIENCIAS No 531 de 2011), y se desarrolla con la financiación de la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL; el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS; la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, UNALMED; y la Universidad Pontificia Bolivariana, UPB.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el sistema de ubicación de un vehículo subacuático operado remotamente, que pueda ser utilizado en un sistema de posicionamiento dinámico.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el estado del arte de los sistemas de posicionamiento dinámico para vehículos subacuáticos operados remotamente.
- Establecer los critérios de selección para un sistema de posicionamiento dinámico de un ROV.
- Seleccionar un sistema que permita determinar la posición de un vehículo subacuático operado remotamente para la fase de operación.

4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se contextualizará al lector con el concepto de vehículo operado remotamente (ROV) y su clasificación, con el concepto de sistema de posicionamiento dinámico (DPS) y los sistemas de ubicación necesarios para los ROV.

4.1. ¿QUÉ ES UN ROV?

Los vehículos subacuáticos se dividen en dos grandes categorías, los vehículos subacuáticos tripulados y los vehículos subacuáticos no tripulados (UUV, Unmanned Underwater Vehicles), estos últimos están definidos por la US Navy's UUV Master Plan como: *"Sumergible autopropulsado cuya operación es completamente autónoma (con misión de adaptación preprograma o control en tiempo real) o con mínima supervisión de control y no está atado por medio de cables, a excepción, posiblemente, de enlaces de datos tales como cables de fibra óptica"*[1].

Según el Manual del ROV [1], la definición establecida por la US Navy, no es una definición estándar en la industria, puesto que considera los UUVs como sinónimo de los vehículos subacuáticos autónomos, pese a que los UUVs se dividen en dos grupos, los vehículos subacuáticos autónomos (AUV, Autonomous Underwater Vehicle) y los vehículos operados remotamente (ROV, Remotely Operated Vehicle). La principal diferencia entre los ROV y los AUV, es la presencia o ausensia de un cable que permite comunicación directa entre el vehículo y la superficie [1]. Los ROV están operados directamente desde la plataforma de control, desde allí se envían órdenes y se reciben señales por medio de un cable umbilical [3], mientras que los AUV tienen comunicación directa con la superficie por medio de señales de radio frecuencia, fibra óptica o a través de un módem acústico [1].

Un ROV es entonces, un robot subacuático no tripulado, atado por medio de un cable a la superficie, el cual cumple diversas tareas que pueden ser riesgosas para el ser humano. El sistema de un ROV está conformado por un vehículo subacuático, conectado por medio de un cable umbilical a la superficie donde se encuentra la plataforma de control y los operadores, un sistema de manipulación para controlar la dinámica del cable, un sistema de lanzamiento y el suministro de potencia [4]. En la Figura 1 se ilustran los componentes básicos de un ROV.

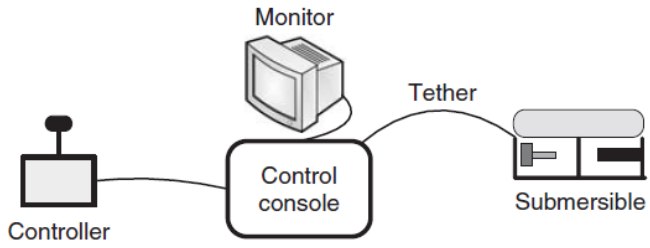


Figura 1. Componentes básicos de un sistema ROV [1].

4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROVS

En el manual del ROV [2] los vehículos subacuáticos se clasifican según se muestra en la Figura 2. Sin embargo, en la norma NORSOK U-102 [5], los ROVs se dividen en 5 clases diferentes.

- *Clase I⟶ Observación pura*
  Esta clase de ROVs están limitados físicamente a video observación. Sólo están equipados con video cámara, luces y propulsores.
- *Clase II⟶ Observación con opción de carga útil*
  Son vehículos que poseen la capacidad de cargar sensores adicionales, tales como cámaras con visión a color, protección catódica, sistemas de medición, cámaras adicionales y sonares, sin perder la función principal.
- *Clase III⟶ Vehículos de trabajo*
  Son vehículos lo suficientemente grandes como para cargar sensores adicionales o manipuladores. Estos ROVs suelen poseer la capacidad de multiplexación, la cual

permite que los sensores y herramientas adicionales puedan operar sin ser cableados a través del sistema umbilical. Se clasifican a su vez en tres categorías, según la potencia de operación.

  - *Clase III A*. Su potencia de operación es menor a 100 hp.
  - *Clase III B*. Su potencia de operación se encuentra entre 100 hp y 150 hp.
  - *Clase III C*. Su potencia de operación es superior a 150 hp.

- *Clase IV⟶ Vehículos de trabajo en el lecho marino*
  Estos ROVs tienen la capacidad de maniobrar en el fondo del mar mediante sistemas de tracción, por rueda o banda, por propulsores de hélice, por chorro de agua o mediante la combinación de los diferentes sistemas de propulsión. Estos vehículos suelen ser más grandes y pesados que los ROVs clase III y están configurados para realizar tareas especiales, como excavación de zanjas para tubería o cableado, dragado u otras operaciones de construcción.
- *Clase V⟶ Prototipos o vehículos en desarrollo*
  Esta categoría incluye los vehículos que están en desarrollo o los que son considerados como prototipos. En esta categoría también pueden ser incluidos los vehículos que no pueden ser clasificados en los otros tipos de ROVs.

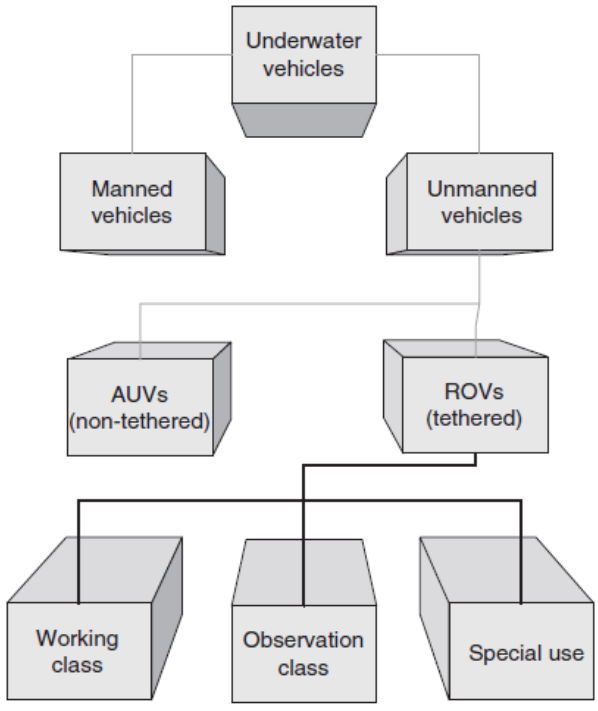


Figura 2. Clasificación de los vehículos subacuáticos [1].

4.3. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO (DPS)

Un sistema de posicionamiento dinámico, DPS, está definido como un conjunto de componentes que le permiten a un vehículo acuático seguir una trayectoria preestablecida o mantener una posición determinada, por medio de la acción de propulsores y hélices [6, 7, 8, 9]. El DPS es un sistema complejo compuesto por diversos sensores, propulsores y algoritmos de filtrado y de control. Los sensores son los encargados de medir la posición del vehículo, mientras que los algoritmos calculan la fuerza que deben ejercer los propulsores para contrarestar las fuerzas ambientales como el viento, la olas y las corrientes [8].

El primer DPS fue introducido en los años 1960s para movimiento horizontal (oleada, balanceo y guiñada) [7], este DPS fue diseñado usando un sistema de controladores PID en cascada, usando filtros *notch*, filtros pasa-bajos o filtros pasa-banda [10], los resultados obtenidos por medio de este sistema de control eran cuestionables [11]. Fue en los años 1970s que se propusieron técnicas de control más avanzadas, basadas en el control óptimo y la teoría del Filtro de Kalman [10]. En los años 1990s el diseño de controladores no lineales para DPS fueron propuestos por diversos grupos de investigación, una de las ventajas de usar la teoría de la nolinealidad es que redujo la complejidad del control eliminando las operaciones de linealización [9]. A medida que los requerimientos y la condiciones de operación se volvieron más exigentes, los estudios en este tema han sido cada vez más complejos. Hespanha [12] propuso el uso de la teoría de control híbrido, el cual combina eventos discretos con control continuo. La idea de utilizar sistemas híbridos de control es que tienen la habilidad de operar ambos controladores al mismo tiempo. Esto permite, que sin importar el estado en el cuál se encuentre la embarcación o sistema marítimo, al presentar desviaciones, éste volverá a su posición establecida [9].

Los DPS tienen un conjunto de componentes que permiten mantener un vehículo acuático en una posición deseada, esto se logra mediante la acción integrada de los sensores, el sistema de control y de los propulsores; el sistema de control depende de la complejidad de operación y de las condiciones operativas del vehículo. En la Figura 3 se puede observar el diagrama de bloques de un DPS, allí se pueden diferenciar los componentes principales que conforman el DPS en un sistema marítimo.

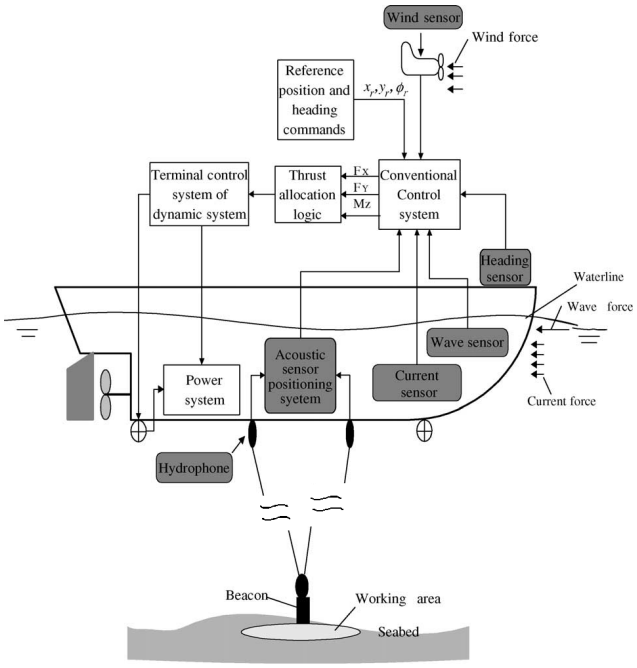


Figura 3. DPS de un sistema marítimo [13].

4.4. SISTEMAS DE UBICACIÓN DE ROVS

La necesidad de implementar sistemas de ubicación en los ROVs nació en 1963, con la pérdida y la dificultad para luego hallar el submarino *USS Thresher*, el cual se hundió a 2560 m de profundidad y con la pérdida de una bomba atómica en la costa de España en 1966 [14]. En los años 1970s, cuando se empezó a usar los ROVs como instrumento para la exploración y explotación petrolera se hizo necesaria una mayor precisión, se implementó instrumentación sísmica la cual emite ondas de radio para establecer la comunicación, pero estas no viajan suficiente distancia en el agua, por lo tanto se hizo necesario implementar nuevas formas de posicionamiento [14].

Unos de los sistemas más implementados para la ubicación y la navegación de ROVs son los posicionadores acústicos [15], estos transmiten la información por medio de pulsos de sonido [14]. Se usa el sonido como señal de comunicación, ya que se propaga

con facilidad en el agua y llega, incluso, a profundidades mayores que las ondas de luz visibles [16]. Sin embargo, el sonido no viaja en línea recta y se ve afectado por las propiedades del agua, por esto es usual que los sistemas de ubicación de los ROVs estén complementados con otros sensores, los cuales proveen información acerca de las propiedades del agua [13].

Un sistema de ubicación acústico muy implementado hoy en día es el transpondedor o *transponder*, éste interactúa con otros *transponders*, los cuales poseen ubicación conocida en el fondo del mar o con la superficie por medio de hidrófonos (*hydrophones*) o con ambos [17]. El *transponder* ubicado en el ROV emite pulsos acústicos y los hidrófonos o los *transponders*, ubicados en el fondo del mar, reciben la información; la posición se determina en función del tiempo que se tarde en recibir la señal emitida desde el ROV [14]. En la Figura 4 se muestran diferentes aplicaciones de este sistema de ubicación.

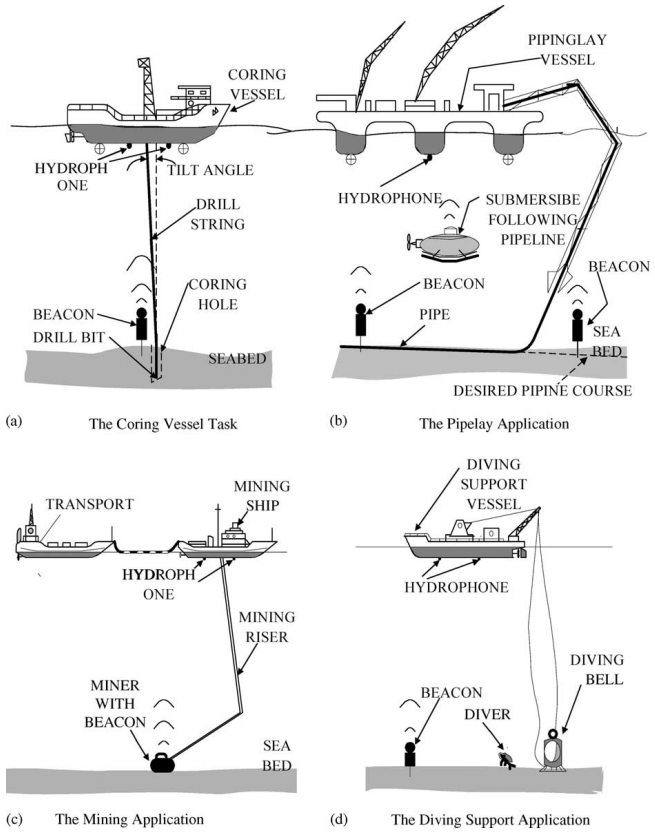


Figura 4. Sistemas de ubicación para vehículos subacuáticos en diferentes aplicaciones marítimas [13].

5. METODOLOGÍA

Para lograr el primer objetivo específico, se realizará una búsqueda completa de información referente a los sistemas de posicionamiento dinámico (DPS) empleados para determinar la ubicación exacta de un ROV. Esta búsqueda será realizada empleando bases de datos como:

- Science Direct
- Google Scholar
- IEEE
- EBSCO Host (Enviroment complete)
- Engineering Village
- ASME

Los libros, artículos, tesis y demás documentos consultados se organizarán mediante el uso de JabRef. Éste es un software de acceso abierto empleado para la administración de referencias bibliográficas. Una vez organizada la información, se inicia con la lectura de ésta para determinar su relevancia e iniciar la escritura del estado del arte.

Para establecer los criterios de selección de un DPS, se definirán los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionarlo, de tal manera que se pueda realizar una evaluación objetiva de los sistemas disponibles comercialmente. Teniendo como base los principales requerimientos del sistema, se realizará una búsqueda de fabricantes y proveedores que comercialicen sistemas de ubicación para ROVs, sus datos principales se organizarán mediante la elaboración de unas páginas amarillas.

Cuando se tengan suficientes opciones comerciales de sistemas de ubicación, se construirá una matriz de decisión, donde se evaluarán las opciones de forma cualitativa y cuantitativa. Según el resultado obtenido, se seleccionará el sistema de ubicación que será instalado en el ROV, que actualmente está siendo desarrollado en el Programa de Robótica Submarina ejecutado por la UPB, UNALMED y que cuenta con financiación

de Ecopetrol y Colciencias.

En la Figura 5 se puede observar la representación gráfica de la metodología empleada para la elaboración del trabajo de grado.

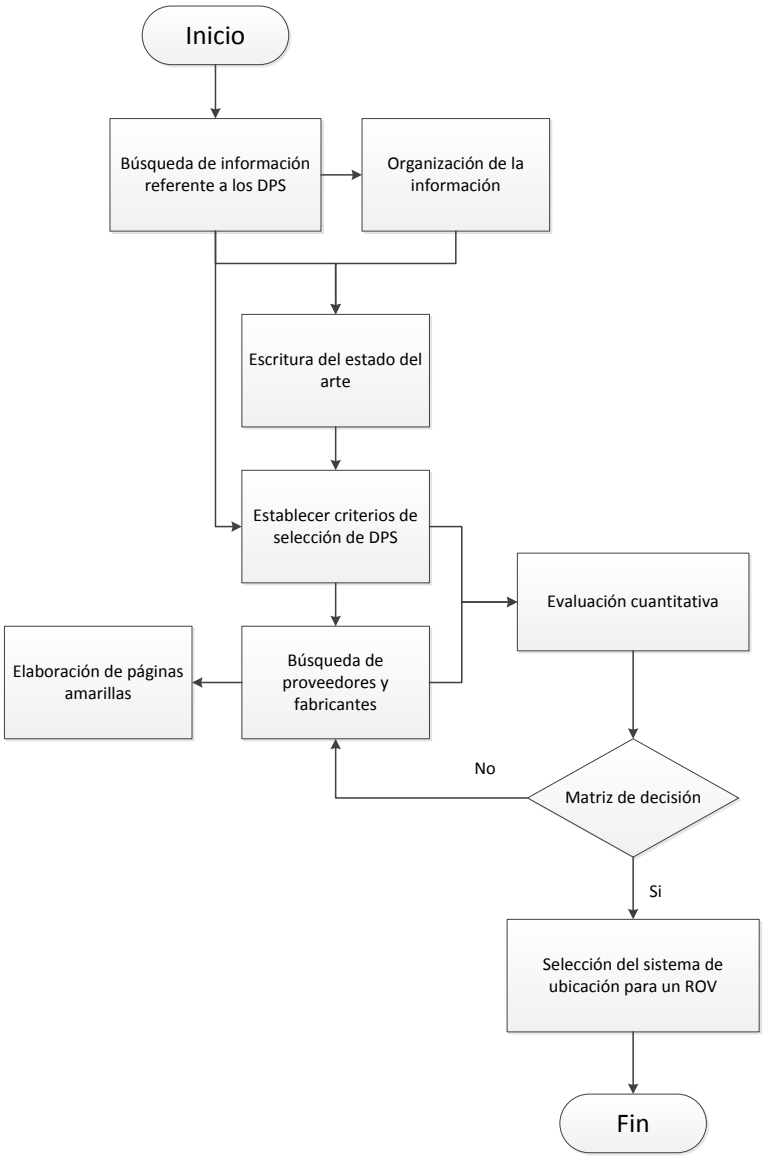


Figura 5. Metodología

6. RECURSOS

6.1. RECURSOS HUMANOS

Estudiante: Verónica Arango Rivera
Cédula: 1.152.436.110
ID: 000 142523
Programa: Ingeniería Mecánica
Teléfono(s): 300 720 3621/250 2081
E-mail: veronica.arangori@alfa.upb.edu.co
Tiempo de dedicación: 500 horas

Director: Rafael E. Vásquez, Ph.D.
Cédula: 71.791.914
ID: 000 008718
Programa: Ingeniería Mecánica
Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana
Teléfono(s): 448 8388 Ext. 14165
E-Mail: rafael.vasquez@upb.edu.co
Tiempo de dedicación: 56 horas

6.2. INSTITUCIONALES

Bases de datos

El acceso a las bases de datos, empleadas para la búsqueda de información durante el desarrollo del proyecto, será proporcionado por la UPB.

7. PRESUPUESTO

En la Tabla 1 se encuentra el presupuesto necesario para la realización del trabajo de grado.

Tabla 1. Presupuesto

	Participación (miles de pesos)		**Implica desembolso**	
Recursos	**Estudiante**	**UPB**	**SI (Nuevo)**	**NO (Existente)**
Bibliografía (Artículos, revistas y libros)		1500		X
Papelería (Fotocopias e impresión)	400		X	
Computador e internet	900	200		X
Transporte	476		X	
Tiempo del Estudiante $/h 8.000	4000			X
Tiempo del Director $/h 60.000		3360		X
Subtotal	5776	5060	-	-
Imprevistos (10%)	577.6	506	-	-
Costo total del proyecto	**11619.6**			

8. CRONOGRAMA

El trabajo de grado tendrá una duración de 7 meses de trabajo y contará con un mes de evaluación y aprobación, tomando un total de 8 meses, iniciará en el mes de abril de 2013, para finalizar en el mes de noviembre del mismo año. En la Tabla 2 se muestra el cronograma a seguir durante el tiempo de desarrollo.

Tabla 2. Cronograma

N. Activ.	**Descripción**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Horas de trabajo**
1	Búsqueda de información	X	X	X			X			48
2	Organizar la información	X	X	X			X			24
3	Escritura del estado del arte			X	X					80
4	Establecer los criterios de selección			X	X	X				16
5	Búsqueda de proveedores y fabricantes		X	X	X					48
6	Elaboración de páginas amarillas				X	X				30
7	Matriz de decisión						X			30
8	Escritura del artículo			X		X				24
9	Escritura del trabajo de grado	X	X	X	X	X	X	X		200
10	Proceso de evaluación y aprobación								X	-
Horas totales para la elaboración del proyecto										500
Número de estudiantes										1
Horas de trabajo por estudiante										500

9. PRODUCTOS ESPERADOS

El trabajo de grado será desarrollado en su totalidad de forma teórica, por lo tanto los productos esperados son documentos escritos, donde se encontrará recopilada toda la información obtenida a lo largo de la ejecución del proyecto propuesto, junto con la selección del dispositivo de ubicación que será implementado posteriormente en el ROV. La documentación que se presentará al concluir el trabajo de grado será:

- Trabajo escrito donde se pone de manifiesto el cumplimiento de los objetivos planteados.
- Un artículo publicable.
- Los criterios de selección que se deben tener en cuenta a la hora de elegir el DPS de un ROV.
- La selección de un sistema de ubicación para el ROV que se está diseñando en el Grupo A+D.

10. IMPACTO AMBIENTAL

El impacto ambiental del "Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, proyecto 1210-531-30550" (programa dentro del cual esta enmarcado el trabajo de grado) fue considerado en la propuesta presentada y aprobada dentro de la Convocatoria COLCIENCIAS No 531 de 2011. Sin embargo, es pertinente aclarar que durante la ejecución del trabajo de grado no se generará ningún tipo de impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. A Bit of History, pp. 1 – 10. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500050

[2] ——, *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. ROV Design, pp. 11 – 45. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500062

[3] H. G. Streeksoff, "Propuesta de nuevos dispositivos, mejoras de circuitos y sistemas implementados en ROVs para trabajos de búsqueda y rescate." in *Facultat de Nàutica de Barcelona*, 2011.

[4] F. Azis, M. Aras, M. Rashid, M. Othman, and S. Abdullah, "Problem identification for underwater remotely operated vehicle (rov): A case study," *Procedia Engineering*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012, ¡ce:title¿International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)¡/ce:title¿. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026112

[5] *NORSOK STANDARD U-102*, Norwegian Technology Centre Std., 2003.

[6] J. Selkainaho, "Tuning a dynamic positioning system," *Automatica*, vol. 29, no. 4, pp. 865 – 875, 1993. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109893900928

[7] T. D. Nguyen, A. J. SÃ¸rensen, and S. T. Quek, "Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions," *Automatica*, vol. 43, no. 5, pp. 768 – 785, 2007. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109807000301

[8] E. Tannuri, A. Agostinho, H. Morishita, and L. M. Jr, "Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control," *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 10, pp. 1121 – 1132, 2010. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066110001486

[9] A. J. Sorensen, "A survey of dynamic positioning control systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 35, no. 1, pp. 123 – 136, 2011. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578811000095

[10] A. Sorensen, S. Sagatun, and T. Fossen, "Design of a dynamic positioning system using model-based control," *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 3, pp. 359 – 368, 1996. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0967066196000135

[11] R. Muñoz, "Control multivariable mediante técnicas QFT: Aplicaciones a sistemas navales," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2007.

[12] J. ao P. Hespanha, D. Liberzon, and A. Morse, "Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching," *Systems & Control Letters*, vol. 49, no. 1, pp. 49 – 65, 2003, ¡ce:title¿Adaptive Control¡/ce:title¿. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167691102003420

[13] W.-H. Cheng, "Study mobile underwater positioning system with expendable and multi-functional bathythermographs," *Ocean Engineering*, vol. 32, no. 3-4, pp. 499 – 512, 2005. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801804001933

[14] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. Underwater Acoustics and Positioning, pp. 81 – 124. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500086

[15] N. McLaren and C. Kuo, "Geometrical aspects of a sonar-based navigation system for underwater vehicles," *Ocean Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 201 – 217, 1996. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/

pii/0029801895000402

[16] R. D. Christ and R. L. W. Sr, *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, ch. Sonar, pp. 125 – 161. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750681483500098

[17] A Grup of Authorities, *Submersible Vehicle Systems Design*, E. E. Allmendinger, Ed. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990.

universidad Pontificia Bolivariana	**ACTA DE PROPIEDAD INTELECTUAL TRABAJOS DE GRADO**	VICERRECTORÍA ACADÉMICA

FECHA: *14 de mayo de 2013*

1. ***NOMBRE DEL PROYECTO*****:** SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO PARA VEHÍCULOS SUBACUÁTICOS OPERADOS REMOTAMENTE

2. PARTICIPANTES

a. ESTUDIANTES

Nombre: Verónica Arango Rivera

No. c.c.: 1.152.436110

Horas dedicadas al proyecto: 500

Programa en el cual se encuentra matriculado: Ingeniería Mecánica.

b. DIRECTOR

Nombre: Rafael Esteban Vásquez Moncayo

No. c.c.: 71.791.914

Empresa donde labora actualmente: Universidad Pontificia Bolivariana

Cargo en la empresa: Profesor Titular

Horas dedicadas al proyecto: 56

3. FUENTES DE FINANCIACIÓN

Fuentes de financiación	Ítem	Aporte en efectivo	Aporte en especie	Total por fuente de financiación
UPB	Bibliografía		*1'500.000*	***5'060.000***
	Internet		*200.000*	
	Tiempo del director $60.000/h		*3'360.000*	
Estudiante	Papelería	*400.000*		***5'776.000***
	Internet		*900.000*	
	Transporte	*476.000*		
	Trabajo Estudiante $8.000/h		*4'000.000*	
Total del proyecto		*876.000*	*9'960.000*	*10'836.000*

4. PRODUCTOS

Los productos a entregar son:

- Copia a la Biblioteca Central de la UPB del documento en papel y medio magnético, que soporta el trabajo de grado, una vez sea aprobado.
- Un artículo publicable.
- Los criterios de selección que se deben tener en cuenta a la hora de elegir el sistema de posicionamiento dinámico de un vehículo subacuático operado remotamente.
- La selección de un sistema de ubicación para el vehículo subacuático operado remotamente que se está diseñando en el Grupo A+D.

5. EQUIPOS Y MATERIAL BIBLIOGRÁFICO

Los estudiantes, director y asesor, se comprometen a devolver a la Universidad Pontificia Bolivariana todo el equipo y material bibliográfico, obtenido con recursos proporcionados por las dependencias académicas y administrativas de la Universidad, una vez termine el proyecto.

6. DURACION DEL PROYECTO

El trabajo de grado tendrá una duración de 7 meses de trabajo y contará con un mes de evaluación y aprobación, tomando un total de 8 meses, iniciará en el mes de abril de 2013, para finalizar en el mes de noviembre del mismo año.

7. PROPIEDAD INTELECTUAL

a. DERECHOS MORALES

Los derechos morales de autor corresponden a los estudiantes, al director y a toda persona que a criterio de éstos, haga aportes originales intelectuales en los avances y en el resultado final del proyecto.

En cualquier tipo de divulgación se dará crédito a los autores y la Universidad Pontificia Bolivariana.

b. DERECHOS PATRIMONIALES

Los derechos sobre los resultados derivados del presente trabajo de grado se rigen por el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad.

A continuación se establecen los porcentajes de participación en aportes y por tanto de derechos de patrimoniales sobre los resultados:

Productos (se deben relacionar los productos mencionados en el numeral 4)	Entidades financiadoras	Monto del aporte	Porcentaje de participación
Trabajo escrito y en medio magnético	-	-	-
Artículo publicable	-	-	-
Criterios de selección	-	-	-
Sistema seleccionado	-	-	-

8. CONFIDENCIALIDAD

Los participantes se comprometen a guardar absoluta reserva sobre la información confidencialita que conozcan o a la que tengan acceso en virtud de su participación en el presente proyecto. Igualmente se comprometen a guardar reserva sobre los resultados innovadores con potencial de aprovechamiento comercial del proyecto.

Igualmente, están en la obligación de no copiar, enviar por fax, reproducir, divulgar, o distribuir el o los documentos, ni en su totalidad o parte, sin el expreso consentimiento por escrito de la UPB.

Acepto que la violación de la reserva a lo aquí convenido dará lugar a la aplicación de las sanciones previstas en el Código Penal, artículo 308 de la Ley 599 del 2000, referente a la

Violación de reserva industrial o comercial, sin perjuicio de las que se imponen por competencia desleal y del cobro de las indemnizaciones a que haya lugar.

9. SOLUCION DE CONFLICTOS

En caso de controversia sobre la interpretación o aplicación de la presente acta, se agotarán en primera instancia los conductos regulares de la Universidad, y en caso de no llegar a ningún acuerdo, se dirimirá el conflicto mediante dos (2) amigables componedores designados por cada parte. La decisión será en equidad y tendrá fuerza vinculante para los intervinientes.

10. CONSTANCIA

Todos los partícipes declaran conocer el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En caso que algún participante se retire antes del 80% de ejecución del cronograma del proyecto, perderá todos los derechos sobre los resultados de la misma.

En caso de presentarse alguna circunstancia que altere los términos de la presente acta, deberá anexarse al presente documento la respectiva modificación aprobada por la respectiva facultad.

Para constancia se firma en Medellín, 14 de mayo de 2013.

Rafael E. Vásquez M., Ph.D.
CC. 71'791.914
DIRECTOR PROYECTO

Diego A. Flórez L., M.Sc.
CC. 98'657.938
DIRECTOR DE FACULTAD

Verónica Arango Rivera
CC. 1.152'436.110
ESTUDIANTE

C. TABLAS DE PRODUCTOS Y FABRICANTES

En el CD hay una carpeta denominada ANEXO C. Esta carpeta está compuesta por dos archivos, uno es la matriz de las alternativas comerciales de los sistemas de posicionamiento; el otro, es la matriz de fabricantes y proveedores de los sistemas de posicionamiento. Adicionalmente, se encuentran 3 carpetas, una de cotizaciones, donde están diponibles las cotizaciones recibidas por los fabricantes; una de fichas técnicas, donde se encuentran los *brochures* y las fichas técnicas de los diversos sistemas de posicionamiento y la tercer carpeta incluye los manuales, en ella se encuentran los manuales de instrucción de algunos de los sistemas.

D. MATRIZ DE DECISIÓN

En el CD hay una carpeta denominada ANEXO D. Esta carpeta está compuesta por la matriz de decisión, donde se evaluaron las alternativas comerciales de los sistemas de posicionamiento.