

-GRADO EN INGENIERÍA ROBÓTICA-
ROBOTS MÓVILES

TRABAJO EN GRUPO
ROBOTS SUBMARINOS

Daniel Jubera Piñero
Pablo García García
Pablo Aguado Álvarez
19/10/2021

ÍNDICE:

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | Página 3 |
| 2. Componentes de robots submarinos | Página 4 |
| 3. Clasificación de los robots submarinos | Página 6 |
| 4. Algoritmos de navegación | Página 12 |
| 5. Simulación de un UUV en Gazebo y RVIZ | Página 21 |
| 6. Ejemplos de robots submarinos | Página 24 |
| 7. Conclusión | Página 27 |
| 8. Bibliografía | Página 27 |

1. INTRODUCCIÓN

Hasta ahora, en esta asignatura se han visto robots que se desplazan por el medio terrestre, sin embargo la superficie del planeta Tierra está cubierta en un 70% de agua. Además, gran parte de este medio no ha sido explorado, ya que presenta múltiples dificultades para un ser humano. Es por ello que en los últimos años se han desarrollado robots capaces de desplazarse y sumergirse en este medio, siendo de gran utilidad para múltiples aplicaciones que se desarrollan en estas condiciones.



Figura 1. Robot submarino LarvalBot

Los vehículos submarinos no tripulados (UUV) o también conocidos como “drones submarinos”, son vehículos que trabajan bajo el agua sin llevar ningún tipo de tripulación. Estos robots desempeñan diversas tareas, de las cuales algunas suponen un gran riesgo para las personas, como puede ser la detección de minas submarinas, la investigación oceánica o la revisión de infraestructuras submarinas.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que poseen grandes desventajas, ya que son robots que funcionan en un medio líquido lo cual plantea problemas como la estanquedad, o la fuerza que ejerce la presión del medio sobre el robot.

2. COMPONENTES DE ROBOTS SUBMARINOS

Entre los robots submarinos, aunque hay una gran variedad, se pueden encontrar unos componentes en común. Estos componentes son los siguientes:

2.1. La cabina

También denominada como casco, representa el material y la estructura del robot submarino en la cual se montarán los elementos del sistema eléctrico y electrónico. Además, dependiendo de factores como la profundidad a la que se espera sumergir el robot, la temperatura o el coste, el diseño se hará de una forma u otra.

2.2. Sensores

Hace referencia a los elementos capaces de dotar información al robot, respecto al entorno que le rodea o a él mismo. Estos sensores se clasifican en:

- Sensores de posicionamiento:

Tales como IMUs, GPS, brújulas, etc. Permiten conocer datos referentes a la posición, la velocidad, aceleración u orientación del robot.

- Sensores de estado interno:

Empleados para obtener datos internos del robot, como la temperatura, el consumo de energía o si se ha filtrado agua debido a alguna fisura.

- Sensores de medición del ambiente:

Miden características del entorno como la cantidad de oxígeno, densidad, PH, etc.

2.3. Sistemas de propulsión

Son aquellos que permiten el movimiento del robot submarino, como podrían ser las turbinas o las aletas. Además, los robots se pueden clasificar en base al tipo de propulsión que incorporan:

- Impulsores de Hélice

El sistema más utilizado en la mayoría de robots. Consta de un motor eléctrico acoplado a una hélice, lo que produce efecto de empuje al desplazar fluido a través de ella.

- Planeador acuático

Diseñados para desplazarse desde la superficie hasta una profundidad, y ascender cambiando su flotabilidad. Además emplea unas alas hidrodinámicas que pueden convertir el movimiento vertical en horizontal, obteniendo un sistema de muy bajo consumo.

- Bioinspirados

Basados en la forma de desplazarse de los peces y cetáceos, así como en su fisiología. Generalmente se inspira en las aletas de estos animales ya que sus movimientos cílicos perpendiculares al plano de estas, generan ondas que les impulsan. Estas aletas solo permiten el movimiento en una dirección, por lo que se necesitan varias.

Otra forma de desplazamiento que se ha probado es el de la deformación del cuerpo, como ocurre en el caso de las anguilas, generando de esta forma las ondas para propulsarse.

- Inyección

Consiste en expulsar agua que previamente ha sido recogida y almacenada. El agua sale a una alta presión generando una aceleración en el robot. Al ser un sistema que no dispone de hélices no puede generar ningún tipo de daño en el entorno que lo rodea.

- Impulsor Magnetohidrodinámico

Basados en unos motores que constan de una canal a través del cual pasa el líquido y además posee electroimanes a los laterales. De esta forma al aplicar un voltaje se genera un campo magnético que crea una fuerza motriz en el líquido. Cabe destacar que este tipo de motores son muy silenciosos.

- Tracción con el fondo marino

Siendo similar a la interacción de los robots terrestres, pero con diferencias como la existencia de fuerzas de mayor viscosidad en este medio que en el terrestre.

2.4. Fuentes de energía

Normalmente se emplean baterías, siendo las que ofrecen energía al robot y limitan el tiempo de operación del mismo.

2.4. Otros

Para realizar misiones de manipulación los robots submarinos requieren de brazos robóticos. En general, los brazos de un ROV son teleoperados utilizando un sistema Maestro-Esclavo. Los ROVs utilizados en la industria del petróleo frecuentemente tienen dos brazos, uno para sujetar el robot a la estructura y el otro para realizar las operaciones requeridas, como lo pueden ser el mantenimiento o la reparación. La mayoría de los manipuladores han sido diseñados para ROVs y estos son controlados mediante actuadores hidráulicos. No obstante, también se han desarrollado brazos actuados por motores eléctricos. Estos son más útiles para IAUVs ya que consumen menos energía que los actuadores hidráulicos

3. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS SUBMARINOS

Los robots submarinos se pueden clasificar de diferentes maneras. Para ello se puede tener en cuenta el nivel de autonomía, es decir, si el robot necesita ser operado o no. Otra manera de clasificar a estos robots es en base al tipo de misión que se va a realizar, es decir la tarea que el robot va a desempeñar. Por último, a la hora de clasificar estos robots, se podría tener en cuenta el sistema de propulsión que utilizan para desplazarse, ya que no es lo mismo un robot que emplea hélices y un motor, que aquel que se aprovecha de la propulsión al expulsar agua.

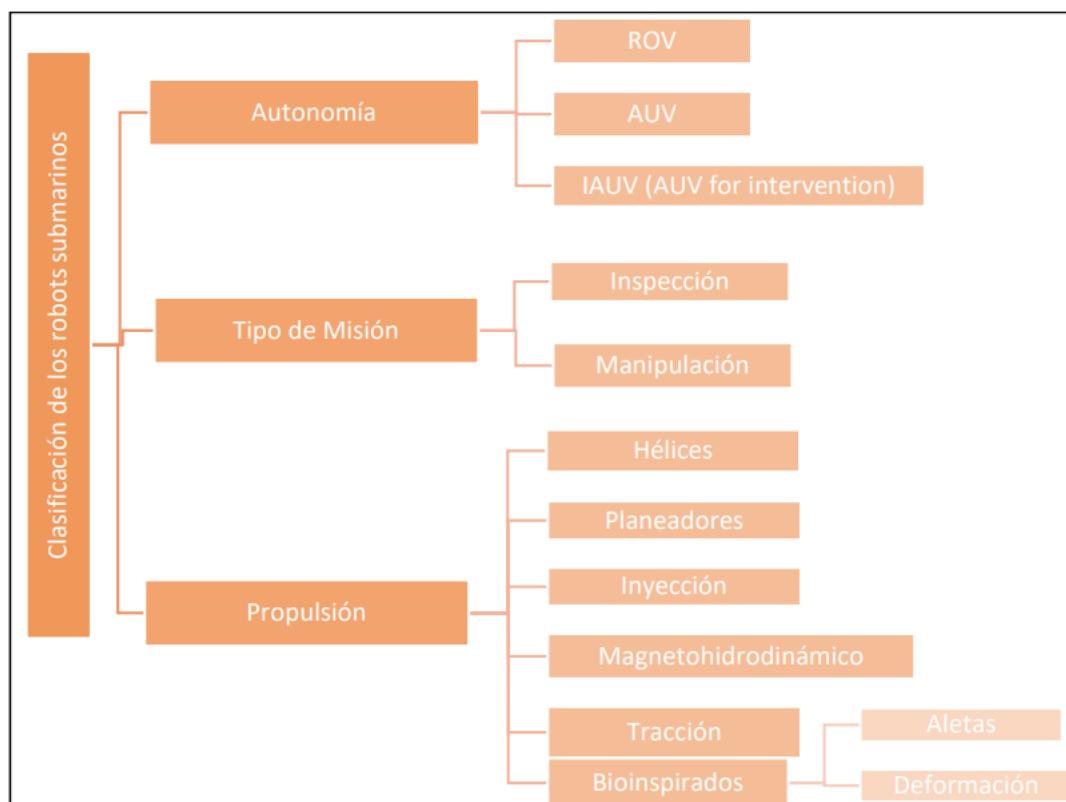


Figura 2. Clasificación de los robots submarinos.

3.1. Clasificación según la autonomía.

- ROVs (Robots Submarinos Operados Remotamente).

Los robots submarinos operados remotamente, conocidos como ROVs de las siglas en inglés de “Remotely Operated Vehicle”, son aquellos robots que son controlados por un operario de forma remota, a bordo de un barco de apoyo en la superficie, mediante un sistema de cableado donde recibe y envía información al usuario, así como también se provee de energía al robot. El vehículo está conectado al barco mediante una correa o un cable de transporte de carga que se utiliza junto con un sistema de gestión de correas cuando se trabaja en aguas más profundas o en condiciones adversas.

Los ROV pueden realizar una amplia gama de tareas, como inspecciones visuales, seguridad ambiental y perforación en alta mar. La mayoría de los ROV tienen múltiples pantallas de superficie para el monitoreo en línea de su estado de trabajo que se alimentan de cámaras de alta definición, videos y manipuladores de brazos robóticos a bordo, y estos sistemas de interfaz humana proporcionados al operador aumentan enormemente el rendimiento de la intervención en ubicaciones y aumentan habilidades de trabajo.

En la figura 3 se puede observar al robot Victor 6000, el cual es un ejemplo típico de ROV científico. El Victor es un sistema operado a distancia que puede sumergirse hasta una profundidad de 6000 m. Dedicado a la investigación científica, este robot permite la transmisión de imágenes ópticas y está diseñado para transportar y utilizar diversos instrumentos y herramientas.

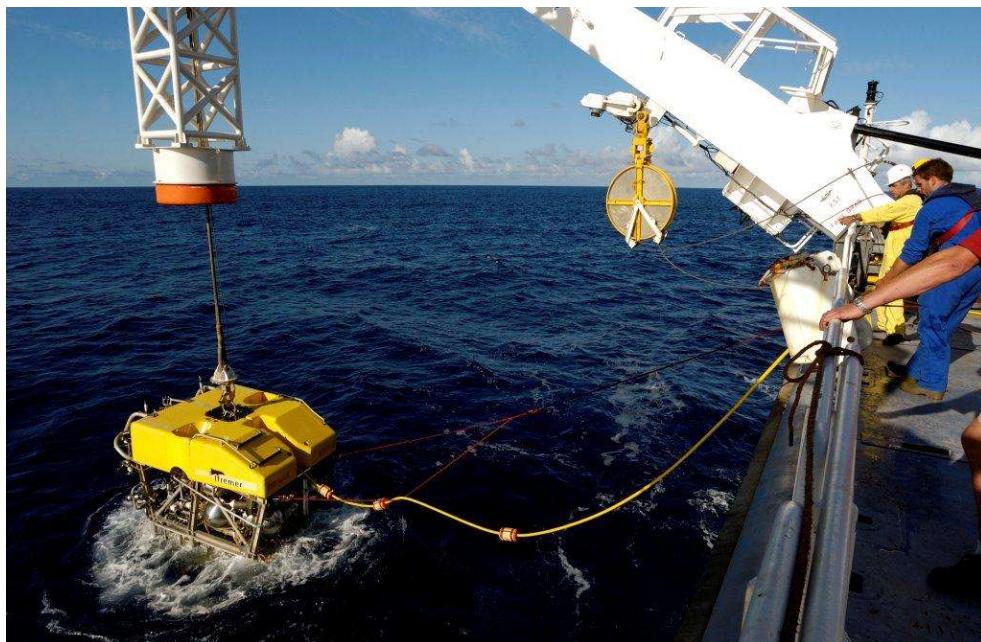


Figura 3. Victor 6000, típico ejemplo de ROV, siendo sumergido

La industria del petróleo y el gas en alta mar compra aproximadamente el 50% de todos los ROV, ya que sus instalaciones requieren una inspección frecuente que es realizada en su mayoría mediante ROVs. Al mismo tiempo, las organizaciones encargadas del salvamento oceánico y la seguridad portuaria utilizan cada vez más los ROV como herramientas eficaces para una variedad de tareas de inspección submarina, como la desactivación de artefactos explosivos, las contramedidas a minas, la inteligencia marítima, vigilancia y reconocimiento.

Por tanto, las operaciones con ROVs aumentan cuanto mayor es la profundidad donde es necesaria realizar una tarea de control o inspección a pesar del tiempo de respuesta del

equipo y de las corrientes de arrastre. Además, estos robots pueden fabricarse de un tamaño mucho menor a otros ya que el sistema de control está fuera de la estructura del robot. Sin embargo, el principal inconveniente de los ROV proviene del hecho de que el vehículo está conectado físicamente al barco o la estación, lo que da como resultado una maniobrabilidad del vehículo restringida y un rango de misión corto. Las cuerdas pueden enredarse o limitar la capacidad del vehículo para sortear obstáculos.

- **AUVs (Robots Submarinos Autónomos)**

Los AUV se consideran una evolución del ROV. Los robots submarinos autónomos son vehículos capaces de funcionar de manera independiente ya que poseen un sistema de control incorporado, así como baterías para proveerse de energía. De esta forma, los AUV son vehículos autopropulsados, no tripulados y sin ataduras que normalmente se despliegan desde una embarcación desde la superficie y pueden ir a la deriva, sumergirse o planear de forma independiente a través del océano sin control en tiempo real por parte de operadores humanos. Los AUV también pueden tomar decisiones de manera inteligente y cambiar sus perfiles de misión en función de los cambios en los datos ambientales. Al evitar el requisito de apoyo persistente de los buques de superficie, los AUV reducen los altos costos de exploración y muestreo oceánicos al tiempo que aumentan la disponibilidad, calidad y cantidad de datos marinos científicos.

Un ejemplo de AUV es la variedad REMUS, el cual se puede observar en la figura 4. Los vehículos de unidades remotas de monitoreo ambiental (REMUS, por sus siglas en inglés) son AUV de bajo costo diseñados originalmente para inspeccionar, cartografiar y viajar metódicamente sobre un área para muestrear características clave del océano.

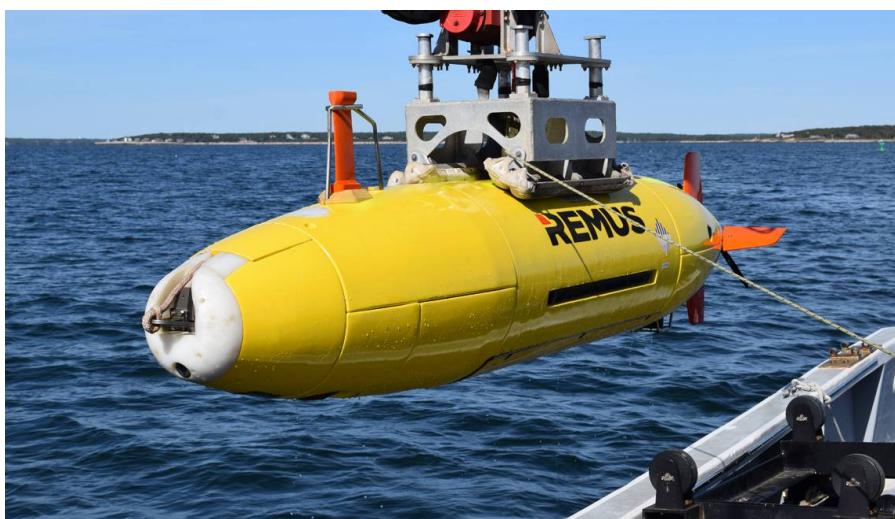


Figura 4. Robot REMUS 6000, ejemplo de AUV

Los avances en sistemas de propulsión y fuentes de energía les dan a estos robots mayor duración en cuanto a distancias y tiempos de operación. A su vez, los AUV disponen de una gran variedad de formas y tamaños, con diferentes opciones para sus medios de propulsión, según las misiones específicas orientadas a aplicaciones para las que se requieren. Aunque algunos AUV tienen una configuración compleja que les permite moverse por terrenos adversos, la mayoría tienen forma de torpedo. Al no requerir de un operario, se reduce el riesgo de fatiga y se provee de una mayor repetibilidad experimental. Se usan principalmente para experimentos científicos y para realizar muestreos y toma de datos.

Los AUV de alto rendimiento llevan un conjunto de sensores avanzados que se pueden usar para una variedad de aplicaciones militares, como ISR (inteligencia marítima, vigilancia y reconocimiento) marítimo, evaluación ambiental rápida y guerra antisubmarina. Pueden ser transportados por cualquier embarcación o incluso desplegarse desde la costa, lo que aporta mayor flexibilidad.

La principal desventaja de los AUV es su baja capacidad de adaptación al cambio ambiental y la escasa capacidad de la intervención autónoma.

- **IAUVs (Intervention Autonomous Underwater Vehicle)**

Una fusión de ambas tecnologías serían los robots IAUV (Intervention Autonomous Underwater Vehicle). El sistema IAUV está diseñado para realizar operaciones similares a las del ROV, pero sin tantas limitaciones y de forma autónoma o supervisada. La consecuencia de esto es que el robot lleva su propio suministro de energía. Además, la manipulación es una tarea compleja que implica un alto grado de autonomía, lo que impone por el momento mantener al operador en el circuito de decisión y control. Aunque en una primera instancia, estos robots realizan un muestreo de forma autónoma del terreno, es el usuario u operario el que, una vez recabada la información, decide el punto donde se realizaría la intervención supervisada.

Estos sistemas están conectados acústicamente con la nave nodriza, mediante una transmisión acústica vertical. Ya que se consigue la mejor comunicación submarina cuando el emisor y el receptor están alineados verticalmente, la nave nodriza debe colocarse sobre la ubicación horizontal de la IAUV, garantizando que ambos sistemas permanezcan en los conos de comunicación, definidos por la apertura del módem acústico.

Su naturaleza aerodinámica, con el fin de reducir el consumo de energía y su capacidad para realizar una estabilización de pose robusta, requieren diferentes tipos de actuación. Estos sistemas pueden combinar superficies de control, potentes propulsores de popa y

propulsores flotantes, otorgándoles una propiedad sobreactuada, lo cual implica resolver un problema sobredimensionado, requiriendo el planteamiento de criterios complementarios, o gestionar secuencialmente diferentes configuraciones de actuación. La estabilidad de los diferentes interruptores entre estas configuraciones es un tema de estudio actual.

Un ejemplo de robot IAUV es el SAUVIM, el cual se define como un vehículo semi-autónomo submarino para misiones de intervención. Este robot se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Robot IAUV SAUVIM

3.2. Clasificación según el tipo de misión.

Según la tarea o misión que tenga como objetivo un robot submarino, se pueden distinguir dos grandes grupos:

- **Robots de inspección.**

Consiste principalmente en la exploración y la adquisición de datos en los medios submarinos. Esta serie de datos pueden ser imágenes captadas mediante cámaras y obtenidas durante su trayectoria, la observación del lecho marino por medio de cartografía acústica, calidad del agua mediante sensores de acidez, entre otros.

En este tipo de tareas no se requiere un brazo manipulador, ni mecanismos para interactuar con el ambiente. Para estos tipo de misiones se suelen utilizar AUVs. Para el cálculo de las trayectorias de este tipo de robots son de vital importancia los algoritmos de navegación así como la detección y evitación de obstáculos.

- **Robots de manipulación.**

Consiste básicamente en la manipulación de objetos y utensilios bajo el agua. Entre estas tareas tenemos el mantenimiento de estructuras subacuáticas; la apertura y cierre de válvulas en instalaciones subacuáticas; la desactivación de minas; el ensamblaje y desensamblaje de componentes; la recolección de muestras para estudios arqueológicos; la intervención en desastres para controlar las fugas de material contaminante o el apoyo en el rescate de personas.

Para llevar a cabo este tipo de misiones el robot debe contar con manipuladores o herramientas para la intervención en el medio. Este tipo de robots son normalmente ROVs, es decir, son teleoperados por lo que deben poseer un sistema de visión en tiempo real, proporcionando imágenes del transcurso de la tarea, para poder realizar la tarea de manipulación. En el caso de ser autónomo las imágenes serán igual de importantes para la supervisión.



Figura 6. Ejemplo de robot de manipulación, Aquanaut (Solo diseño)

3.3. Clasificación según la propulsión.

Como ya se explicó en el punto 2.3 los robots submarinos tienen varias formas de moverse bajo el agua. Los UUVs también se pueden clasificar según el sistema de propulsión que utilizan.

Según el tipo de misión que se quiera llevar a cabo con el robot será necesario utilizar una propulsión u otra. Por ejemplo, si se busca realizar una exploración o investigación sin perturbar en la medida de lo posible a los animales marinos, una opción muy acertada sería usar un biorobot con forma de pez con propulsión bioinspirada.

4. ALGORITMOS DE NAVEGACIÓN

El sistema de navegación recibe la información de los sensores de posición, velocidad y aceleración del robot submarino. Mediante un observador u otros algoritmos procesa esta información y posteriormente la envía al Sistema de Guiado y al Sistema de Control.

4.1. Algoritmos de planificación de rutas

El path planning es el encargado de encontrar el curso de los puntos a través de los cuales un AUV debe viajar para llegar al destino predefinido desde la ubicación de inicio.

La navegación AUV es un aspecto muy importante de la planificación de la ruta. No hay comunicación externa ni señales de GPS disponibles para envíos submarinos. Por lo tanto, sin información de dirección y una potencia restringida, es muy difícil para un AUV navegar hacia el objetivo deseado.

Para mejorar el rendimiento de los AUV desplegados en diferentes aplicaciones, como estudios oceanográficos, búsqueda y detección de minas en misiones militares, es necesario desarrollar un controlador de planificación de la ruta adecuado que proporcione un control preciso y rápido del sistema de propulsión de un AUV.

El entorno submarino juega un papel importante en la planificación de la ruta de los AUV. El entorno marino está sujeto a un gran conjunto de factores desafiantes, como factores atmosféricos, factores costeros y factores gravitacionales. Los factores atmosféricos incluyen vientos, luz solar y precipitaciones. Los factores costeros se refieren a los ríos, los glaciares y los factores gravitacionales incluyen la rotación de la tierra, el lecho marino y las mareas. La navegación de un AUV se ve afectada en gran medida por las olas generadas por el viento, el propio viento y las corrientes oceánicas. El efecto de la corriente oceánica hay que tenerlo muy en cuenta en la determinación de la trayectoria. El entorno oceánico es impredecible y variable en el tiempo, pero a veces los efectos de los factores ambientales pueden aproximarse para producir un modelo de comportamiento predecible del entorno submarino. El entorno se considera impredecible cuando los cambios en el entorno son inciertos o desconocidos. Por lo tanto, el entorno submarino se puede caracterizar como predecible e impredecible.

Existen diversos algoritmos de optimización para generar rutas óptimas para un solo AUV como se representa en la figura 7.

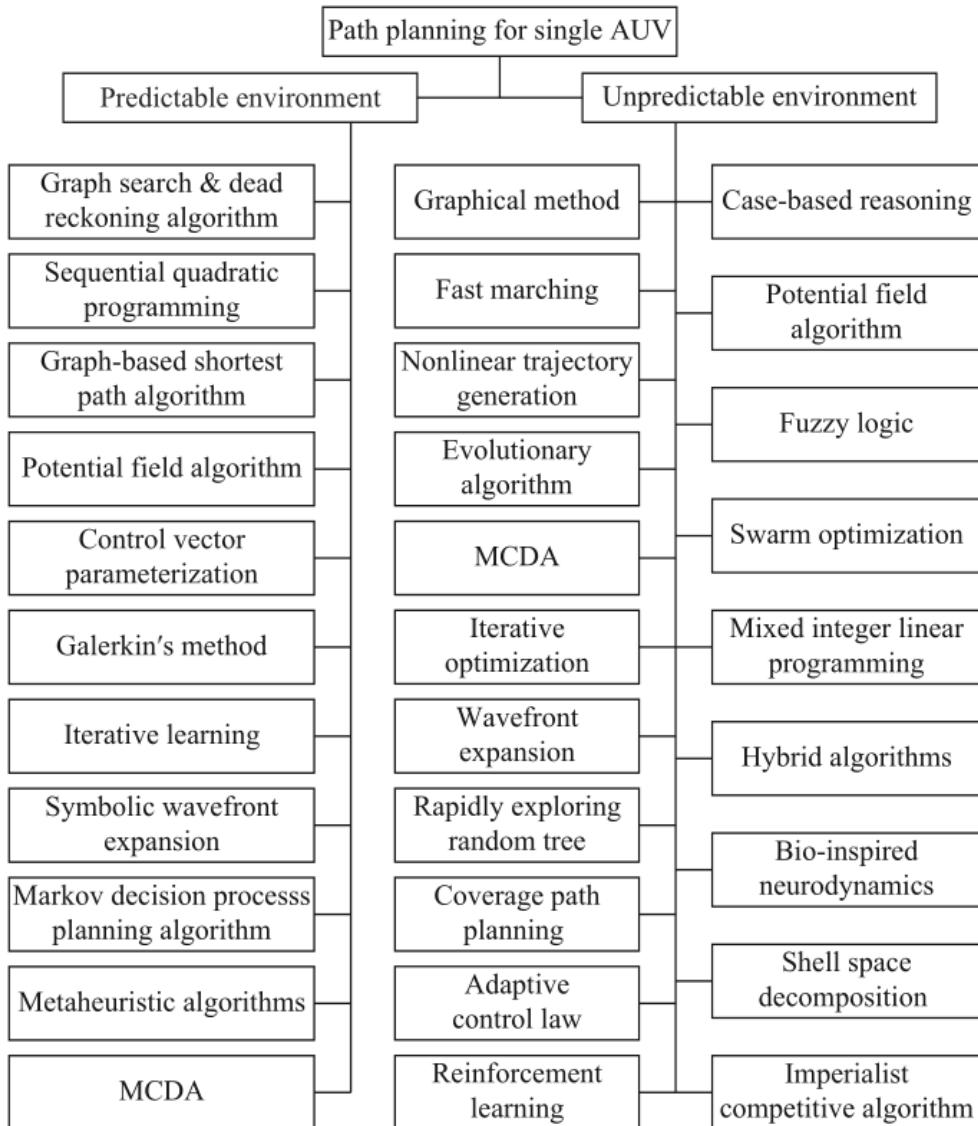


Figura 7. Diversos algoritmos de control de planificación de rutas para un solo AUV

En este trabajo se van a desarrollar brevemente algunos de los algoritmos de la figura tanto para entornos predecibles como impredecibles.

4.1.1. Path planning en un entorno predecible

El entorno submarino está sujeto a variabilidad. En un entorno predecible, la planificación de la ruta se ocupa de recorrer una trayectoria libre de colisiones desde la posición inicial hasta la final mientras se evitan los obstáculos en la ruta del AUV.

Respecto a los algoritmos de planificación de la ruta en entorno predecible se desarrollarán el de Programación cuadrática secuencial, APF y Control de aprendizaje iterativo.

Programación cuadrática secuencial (SQP)

La técnica de “programación cuadrática secuencial (SQP)” se basa en una geometría sólida constructiva. SQP describe los obstáculos como restricciones que deben satisfacerse durante la exploración del espacio mientras se minimiza la distancia euclídea hasta el destino. El problema de los mínimos locales y los obstáculos que se mueven rápidamente ha sido bien abordado en este contexto.

Este método se ha aplicado para obtener rutas óptimas en el tiempo, parametrizadas por los tiempos de conmutación para un grupo de AUV llamados “planeadores submarinos”. El enfoque empleó el principio máximo para optimizar la estructura de “extremos singulares”, pero ignoró el costo de la energía.

Se propuso otro esquema para evitar obstáculos compuesto por un marco de dos niveles, que enfatiza la velocidad de búsqueda y los requisitos de espacio. El nivel superior se ocupa de la planificación del curso para generar un lugar para que lo siga el AUV. El nivel inferior se ocupa de la evitación de obstáculos y la desactivación del módulo de curso utilizando un “controlador reactivo”. Este método se basó en la optimización local y en la información de obstáculos detectada por el sensor instantáneamente, pero descuidó los nodos abiertos. El mayor número de “bordes radiados” provoca un aumento de longitudes que no es práctico para reflejar la variación en el flujo de corriente.

Con este método se consigue evitar colisiones y otros obstáculos y su coste computacional es bajo, aunque este aumenta con el número de “bordes radiados”.

Campos de potencial artificiales (APF)

Warren sugirió el esquema de “campos de potencial artificiales (APF)” en 1990. Los métodos APF se implementan en los obstáculos y puntos objetivo y el campo resultante determina la ruta de un AUV. Se introduce una función de coste para evaluar una ruta y optimizar los parámetros de la ruta para un valor mínimo. APF es un método rápido que se puede aplicar a problemas de dimensiones superiores, pero es vulnerable a los mínimos locales. También se propuso un planificador de rutas que utiliza campos de potencial para una aplicación de imágenes del lecho marino. Los AUV se emplean a baja altitud con alta velocidad de sobretensión y no necesitan sensores costosos.

Un ejemplo de pseudocódigo de este algoritmo se puede ver a continuación.

```

Initialize: Map  $M$ , starting point  $m_{start}$ , Destination point  $m_{end}$ 
Decide path  $P$ 
for all location  $m$  in  $M$  do
   $F_{att}(m) \leftarrow \frac{1}{2}\varepsilon|m - m_{goal}|^2$ , where  $F_{att}(m)$  is attraction force at point  $m$ 
  for all obstacle  $O_i, i=1, 2, \dots, n$  do
    if  $m$  is  $O$  then
       $F_{rep}(m) \leftarrow \infty$ , where  $F_{rep}(m)$  is the repulsive force at point  $M$ 
    else
       $D \leftarrow \text{minimum distance to polygon}(m, O_i)$ 
       $C_i \leftarrow \text{closestPointOnObstacle}(m, O_i)$ 
      if  $D < M_i^*$  then
         $F_{rep_i}(m) \leftarrow \eta \left( \frac{1}{M_i^*} - \frac{1}{D_i(m)} \right) \frac{m - C_i}{D_i^2(m)}$ 
      else
         $F_{rep_j}(m) \leftarrow 0$ 
      end if
    end if
  end for
  end for
  while  $m \neq m_{end}$  do
    Add  $m$  to  $P$ 
     $\nabla F(m) \leftarrow \nabla F_{att}(m) + \sum_{i=1}^n \nabla F_{rep_i}(m)$ 
     $m \leftarrow m - \Delta \nabla F(m)$ 
  end while

```

Control de aprendizaje iterativo

Se ha presentado un método de control de tiempo óptimo que utiliza "control de aprendizaje repetitivo y transformación de escala de tiempo" para AUV. Este enfoque asumió trayectorias espaciales fijas de movimientos para AUV y la estimación de parámetros físicos no es esencial para formular un patrón de par de entrada. El problema de la planificación óptima de la ruta en tiempo real para AUVs con configuración de propulsor simétrico se ha abordado para estimar una solución analítica. Se produjo un control de seguimiento de ruta casi óptimo para AUV tanto en entornos bidimensionales como tridimensionales, como se puede ver en la figura 8.

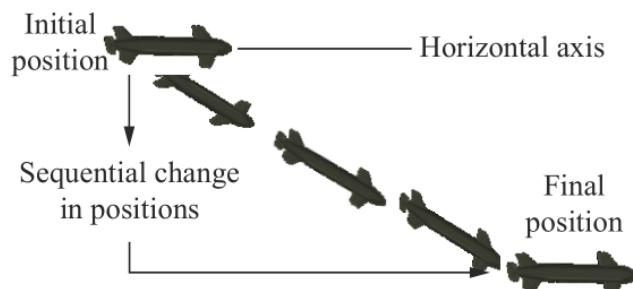


Figura 8. Un AUV inestable que se mueve en un plano vertical

Este enfoque no es adecuado cuando la velocidad del AUV es muy baja, ya que, a una velocidad muy baja, los resultados matemáticos difieren de los resultados aproximados. La programación dinámica se ha utilizado para abordar el problema de planificación de la ruta óptima en el tiempo de los AUV en presencia de obstáculos.

4.1.2. Path planning en un entorno impredecible

Las prestaciones de los algoritmos clásicos de planificación de rutas en “inteligencia artificial” no son especialmente satisfactorias. Estos algoritmos tampoco son adecuados para sistemas que se mueven en un entorno oceánico hostil con restricciones de tiempo real. Para resolver los problemas anteriores se han propuesto métodos como los algoritmos evolutivos, el árbol aleatorio de exploración rápida (RRT) o la expansión de frente de onda (Wavefront expansion), entre otros. A continuación, se desarrollarán estos tres algoritmos como ejemplo de planificación de la ruta en entorno impredecible.

Algoritmos evolutivos

Pueden ocurrir muchos eventos imprevistos mientras un AUV está en el océano, lo que lleva a la violación de las restricciones de la ruta existente. Se ha utilizado un sistema de aprendizaje basado en algoritmos genéticos para desarrollar otro algoritmo robusto para evitar colisiones en la planificación de rutas de AUV en tales situaciones en tiempo real. Su funcionamiento se puede observar de forma esquematizada en la figura 9. En las regiones costeras, el entorno oceánico varía tanto en el espacio como en el tiempo. Aquí los AUV también encuentran fuertes campos de corriente. Por lo tanto, siempre se fomenta la planificación de la misión que minimiza el gasto de energía. Esto se puede lograr mediante la integración de la información sobre la variabilidad del espacio-tiempo ambiental en los algoritmos de planificación de rutas existentes. El algoritmo genético es útil para encontrar la solución a partir de una gran población, pero requiere una gestión adecuada de la memoria.

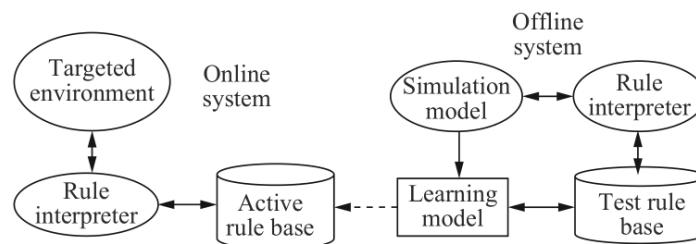


Figura 9. Aprendizaje basado en modelos de simulación

Los "operadores genéticos" se emplean para hacer converger los mínimos locales debido a la estructura del campo actual al mínimo global. La programación dinámica se ha utilizado como una técnica de optimización para generar una ruta segura para el AUV empleado en misiones con un uso exhaustivo de la energía al minimizar el costo de esta. Se ha supuesto que la propulsión sobre el AUV es constante. No se pueden generar caminos de energía nula debido a la falta de libertad de decisión. Cuando la escala del problema aumenta, los algoritmos deterministas encuentran problemas ya que la planificación de rutas para los AUV es muy compleja. Se ha presentado un algoritmo genético adaptativo que puede explorar el espacio de soluciones más grande para encontrar una solución global aproximada para el problema de planificación de rutas AUV.

Este enfoque generó una ruta óptima y sin obstáculos en tiempo real con menos puntos de referencia en un amplio entorno submarino. Se asume un entorno submarino estático y se aplica un algoritmo genético a la planificación de rutas de un AUV. Puede encontrar niveles óptimos casi globales para la navegación AUV con un gasto mínimo de energía.

Se define la ruta de los AUV como una serie de puntos en el dominio del problema. El dominio del problema se ha dividido en subdominios paralelos. Un subdominio se conoce como "punto de ruta" y se representa mediante cuadrícula, como se puede ver en la figura 10. La trayectoria del AUV se ha obtenido conectando estos "waypoints". El costo de la ruta se calcula en función de la longitud de la ruta, el costo de la energía, la seguridad y las restricciones de curvatura de los AUV mediante el empleo del "método de penalización". La calidad de las rutas se ha evaluado utilizando un algoritmo adaptativo de "evolución diferencial".

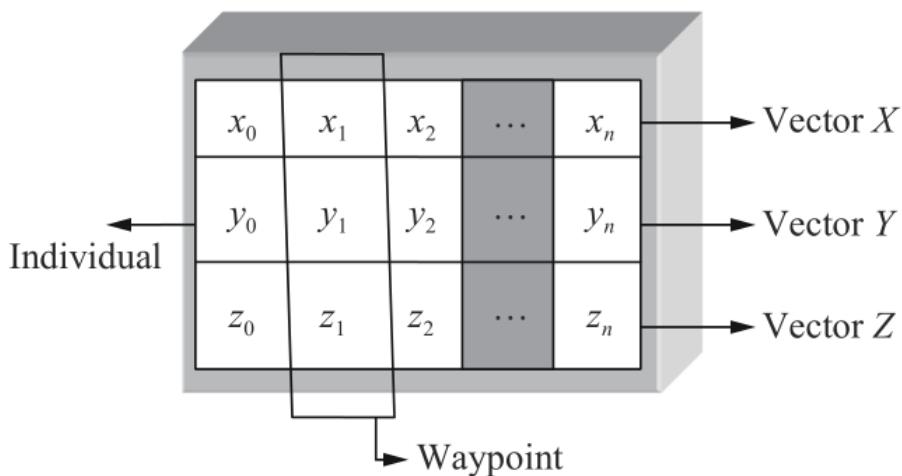


Figura 10. Representación de un punto de ruta "waypoint"

Otra visión abordó el problema de la “planificación de la trayectoria del planeador submarino” con “restricciones de terreno” específicas mediante la aplicación de la evolución diferencial. Cuando se detecta una colisión, la velocidad del planeador se vuelve cero y permanece en esa ubicación hasta que se detiene la simulación. Las colisiones inoportunas obstruyen la evaluación de algunas buenas trayectorias y no se ha especificado ningún corredor especial hacia el mar. Se ha sugerido una planificación de la trayectoria del planeador submarino “limitada por el corredor” en la que las trayectorias AUV resultantes se han restringido completamente a un “área de corredor” a lo largo del límite de un “remolino de sub-mesoescala” oceánico utilizando un algoritmo de evolución diferencial autoajustable.

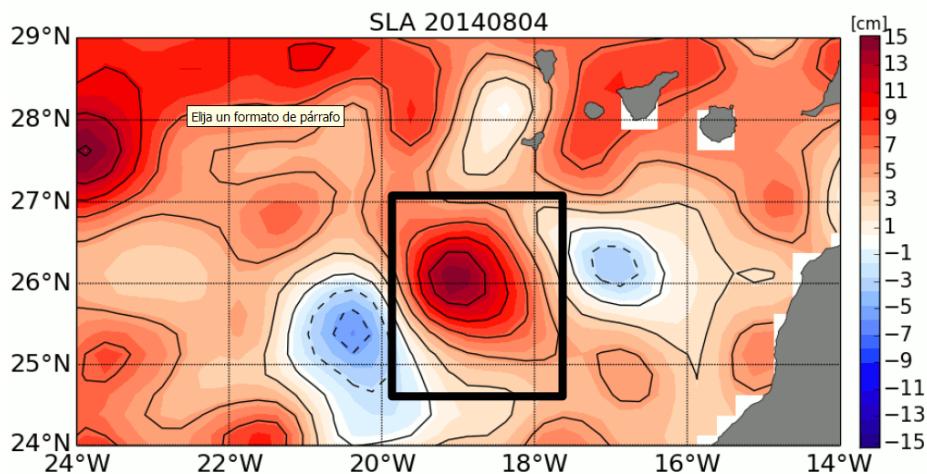


Figura 11. Remolino de sub-mesoescala

RRT

Se ha propuesto un algoritmo llamado “árbol aleatorio de exploración rápida en cualquier momento (ARRT)”. Es un método de planificación de ruta basado en muestreo. En este proceso, se genera una cadena de RRT donde cada nuevo RRT utiliza la información de costos del RRT anterior para crecer, lo que resultó en una trayectoria óptima.

Se propuso un método que utiliza la información del dominio de trabajo para identificar las “clases de homotopía”. Estas clases describen gráficamente los caminos que atraviesan los obstáculos en el dominio de trabajo 2D. Estas clases se han organizado según la aproximación heurística del “límite inferior” de la clase. Solo se puede permitir que las clases con un “límite inferior” más pequeño guíen a un planificador de rutas RRT. Este método proporcionó rápidamente algunos buenos caminos libres de obstáculos y, por lo tanto, actúa como un ARRT.

```

Initialize RRT ( $M, T$ )
 $T.add(m_{start});$ 
Grow RRT ( $m, T$ )
   $m_{new}=m_{start};$ 
  while ( $Distance(m_{new}, m_{goal}) > distance - threshold$ )
     $m_{target} = Choose\ Target\ O;$ 
     $m_{nearest} = Nearest\ Neighbor(m_{target}, T);$ 
     $m_{new} = Extend(m_{nearest}, m_{target}, T);$ 
    if ( $m_{new} \neq null$ )
       $T.add(m_{new})$ 
ChooseTarget ()
   $p = Random\ Real([0.0, 1.0]);$ 
  if ( $p < goal - sampling - prob$ )
    return  $m_{goal};$ 
  else
    return Random Configuration  $O;$ 
Main ()
  Initialize RRT ( $tree$ );
  Grow RRT ( $tree$ );

```

Otros propusieron un enfoque dinámico de “navegación asistida por el terreno” para la planificación dinámica de trayectorias basada en cambios en las variaciones topográficas del lecho marino con precisión posicional mejorada. Esta investigación emplea el algoritmo RRT* para módulos de planificación de rutas. En RRT*, el nodo principal y el secundario tienen una relación de costo mínimo en lugar de la distancia mínima como en RRT. RRT* también es útil como planificador de rutas geométricas fuera de línea para planificar rutas de seguridad para AUV. Pero es poco práctico de implementar debido a las dificultades de reconexión con respecto a la dinámica AUV.

Wavefront expansion

El planificador propuesto utiliza una "expansión de frente de onda" para calcular el tiempo de viaje de AUV para llegar a cualquier destino en un espacio 3D espacio-temporal, como se ve en la figura 12. Optimiza un "criterio de llegada" más rápido justificado para llegar a un destino predefinido lo más rápido posible, asumiendo que el AUV puede entonces mantener su posición contra las corrientes marinas hasta que transcurra el tiempo requerido para recuperarse de los errores de incertidumbre de ejecución.

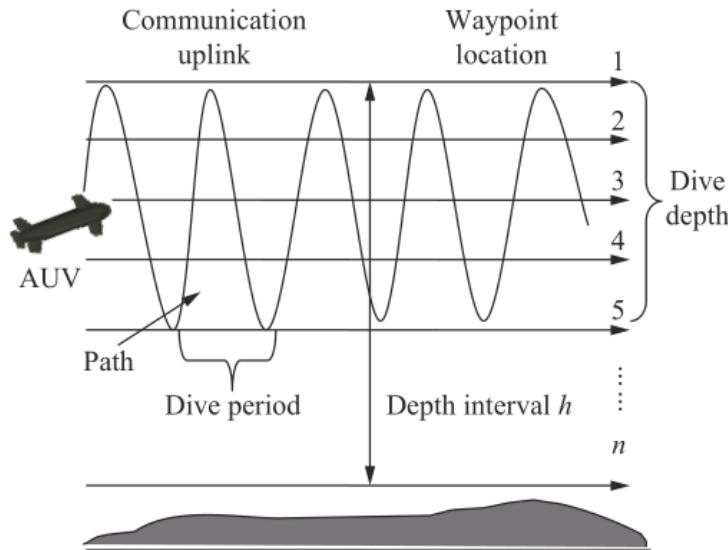


Figura 12. Perfil de inmersión para un movimiento AUV simplificado

Este método podría detectar destinos peligrosos a evitar. Se propuso el esquema de “expansión de frente de onda deslizante” que optimiza una función de coste válida. Esto garantiza la disponibilidad de una ruta precisa arbitraria en un entorno 2D.

4.2. Algoritmos de detección y evitación de obstáculos

A parte de los algoritmos de navegación también son importantes los algoritmos de detección y evitación de obstáculos. Entre ellos se pueden distinguir:

- Algoritmos tipo bug:

Estos algoritmos se basan en el sistema de los insectos para detectar obstáculos y superarlos. Cuando el robot se encuentra con un obstáculo en la trayectoria (calculada como la ruta directa y más rápida al objetivo), este sigue el contorno del mismo hasta seguir el camino que había fijado. Si se recorre el contorno completo del obstáculo, se concluirá que es imposible llegar al objetivo.

- Algoritmo VFH:

Diseñado para poder detectar obstáculos mientras que el robot se desplaza hacia el objetivo. Este se basa en la creación de un histograma bidimensional creado a partir de las lecturas de los sensores. A continuación se divide el histograma en celdas que representan la probabilidad de que haya objeto en esa posición. Después se transforma el histograma para saber la probabilidad del obstáculo según la orientación del robot, y por último se aplica una función de coste para llegar al objetivo con el menor posible.

- Algoritmo de campos de potencial:

Se basa en representar al robot como una partícula que sufre una serie de fuerzas. De tal forma que el objetivo genera una fuerza de atracción mientras que los obstáculos de repulsión.

- Algoritmo DWA:

Planificador local que solo tiene en cuenta los parámetros dinámicos del robot. Por lo tanto solo se trabaja en el espacio de las velocidades. Se calcula un espacio válido de velocidades y se elige la velocidad óptima, siendo esta la que maximice la orientación hacia el objetivo.

5. EJEMPLOS DE ROBOTS SUBMARINOS

5.1 CRYOBOT. (ROV)

Es un robot diseñado para penetrar en el Casquillo Polar Norte de Marte o en la gruesa capa de hielo que rodea la luna de Júpiter, Europa. La mejor manera de explorar cualquiera de estos entornos es un vehículo de penetración, que lleva un conjunto de instrumentos adecuados para el muestreo y análisis de los entornos de hielo u océano. Este proyecto hace uso de la tecnología de generador de radioisótopos termoeléctricos (RTG) como el calor primario (1 kW total) y la fuente de alimentación para el vehículo robótico. Los sistemas de potencia de milivatios de la unidad del calentador de radioisótopos (RHU) (120 mW en total) también se emplean para alimentar los transceptores de hielo de mini-ondas de radio, que se utilizan para transmitir datos a través del hielo hasta el módulo de superficie. Los resultados del trabajo de modelado y diseño para ambas áreas se analizan en este documento.



Figura 13. Representación del robot CRYOBOT

Tanto para Marte como para Europa, el mayor interés científico es llegar a las regiones donde hay un depósito de agua que puede producir signos de vida pasada o existente. La penetración de un casquete polar en Marte nos ayudaría a comprender tanto las historias climáticas como las de deposición tal vez desde hace 20 millones de años. De manera similar, la penetración de la capa de hielo de Europa permitiría a los científicos desentrañar los misterios que rodean la gruesa capa de hielo, su composición química y las propiedades del océano subsuperficial. No obstante, no se tomará ninguna decisión sobre el diseño final del cryobot hasta que se complete el proceso de revisión ambiental. Cualquier uso del cryobot para Marte o Europa se ajustará a todos los requisitos ambientales y de protección planetaria.

5.2. NEREUS. (HÍBRIDO)

Es un nuevo vehículo submarino híbrido operacional diseñado para realizar estudios científicos y muestreos a toda la profundidad del océano de 11,000 metros, casi el doble de profundidad que cualquier vehículo operacional actual. Nereus opera en dos modos diferentes. Para una inspección de área amplia, el vehículo puede funcionar sin ataduras como un vehículo submarino autónomo (AUV) capaz de explorar y mapear el fondo marino con sonares y cámaras. Para imágenes de cerca y muestreo, Nereus se puede convertir en el mar para operar como un vehículo atado a distancia (ROV). Este proyecto incluye carcasa de presión de cerámica y esferas de flotación, manipulador y sistema de muestreo, atadura de fibra óptica ligera, iluminación e imagen, propulsión por hélices, etc.

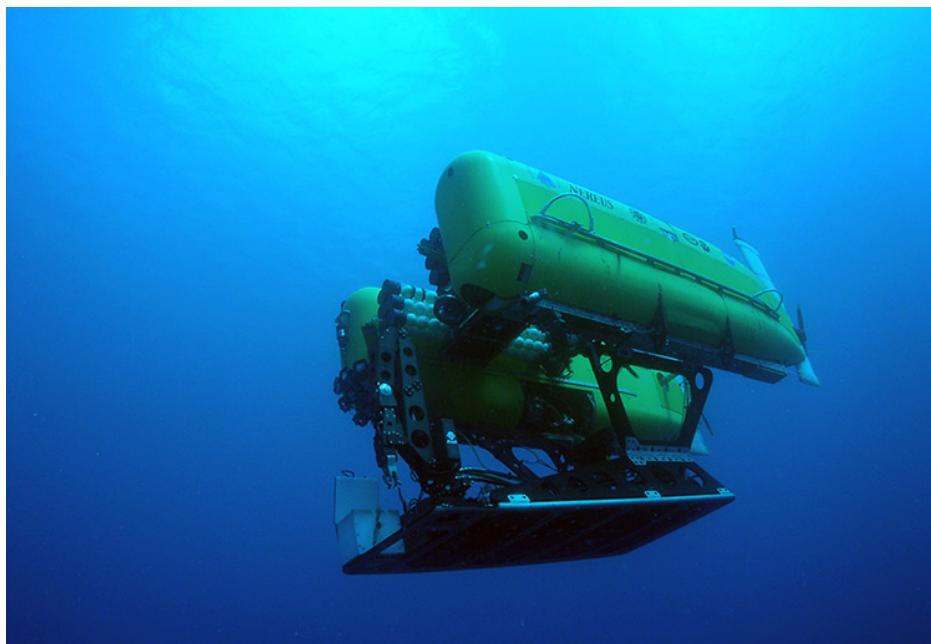


Figura 14. Vehículo submarino híbrido NEREUS

5.3. ANGUILA ROBOT.(AUV)

Un grupo de científicos de la Universidad de California ha conseguido desarrollar una especie de músculos robóticos suaves y transparentes que se mueven con energía eléctrica. El robot tiene 22 centímetros de largo, 5 centímetros de ancho y 1,5 milímetros de grosor. La tecnología imita el movimiento ondulatorio de una anguila, una onda que recorre todo el cuerpo del robot compuesto de tres módulos. Para imitar el movimiento del animal marino, el robot se compone de seis actuadores ubicados en secuencia y unidos a través de un tubo de silicona lleno de agua. El robot se mueve de forma silenciosa, un factor que toma especial relevancia en actividades de monitorización y dado que es blando reduce el riesgo de dañar la vida marina o estructuras frágiles en caso de contacto entre el robot y el ambiente. El robot es capaz de nadar a una velocidad máxima de 1,9 milímetros por segundo.

Este nuevo desarrollo se sirve de actuadores dieléctricos de elastómeros (DEA) que le confieren flexibilidad, invisibilidad y, además, no emiten ningún tipo de ruido. Estos actuadores dieléctricos se articulan como una avance prometedor en el mundo de la robótica para el desarrollo de músculos artificiales y microfluidos. Y es que esta tecnología presenta un rápido ratio de respuesta, alta eficiencia y bajo coste.



Figura 15. Anguila robot, visible gracias a una inyección de tinta brillante

6. SIMULACIÓN DE UN UUV EN GAZEBO Y RVIZ (ROS)

Se ha probado una simulación de un robot submarino utilizando ROS Melodic. En esta simulación se pueden cargar diferentes mapas y mover el robot por estos medios. El robot simulado es el RexRov 2. Este robot submarino no existe en la realidad solo se utiliza para hacer pruebas en simulaciones.

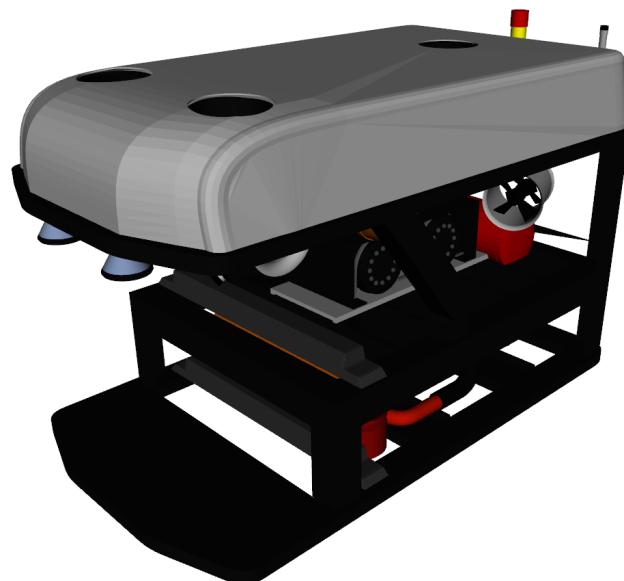


Figura 16. Diseño del REXROV

Aunque el RexRov 2 sea un robot digital que solo se puede usar en simulaciones, sus dimensiones y parámetros son similares al modelo real SUB-Fighter 30k. Este robot, entre otras cosas, está especialmente diseñado para su uso en arqueología marina. Por ello, como se puede ver en la figura 17, puede tener incorporado un brazo manipulador.



Figura 17. SUB-Fighter 30k.

Para poner en marcha esta simulación primero se tendrá que copiar el entorno de la simulación del UUV de un GitHub. Esto se puede hacer lanzando el siguiente comando:

```
git clone https://github.com/uuvsimulator/uuv_simulator.git
```

A continuación se tendrán que compilar los paquetes. Este paso es el más tedioso ya que se tendrán que lanzar los comandos para compilar numerosas veces hasta que estos finalmente se compilen sin ningún problema. Esto se puede hacer con uno de los siguientes comandos:

```
catkin_make
```

```
catkin build
```

Una vez compilados se podrá generar el mundo en gazebo y colocar el robot que se va a simular (En nuestro caso el REXROV). Se puede modificar la línea 6 del código “*start_tutorial_dp_controller_demo.launch*” para elegir el mundo deseado. Los archivos .world que vienen con la simulación están en la carpeta “*worlds*” dentro de “*uuv_gazebo_worlds*”. También, se podrán ver los datos recogidos por los radares y las cámaras en RVIZ, así como el robot y todas sus partes: turbinas, sonars, etc. El comando es el siguiente:

```
roslaunch uuv_tutorial_dp_controller start_tutorial_dp_controller_demo.launch
```

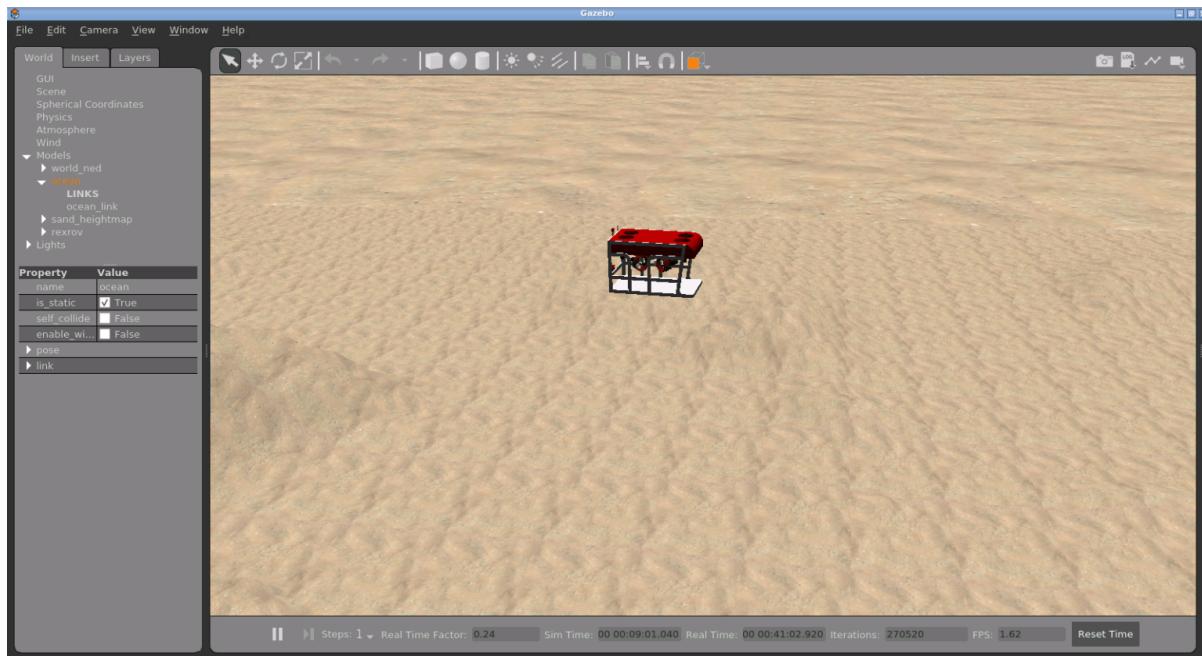


Figura 18. REXROV simulado en Gazebo

Finalmente, una vez generado el mundo y el robot, este podrá realizar diferentes trayectorias según el comando que se lance.

Para realizar una trayectoria helicoidal:

```
roslaunch uuv_control_utils start_helical_trajectory.launch uuv_name:=rexrov2 n_turns:=2
```

Para realizar una trayectoria según unos puntos guardados en un archivo .yaml. Se realiza una interpolación que puede ser: “linear”, “cubic”, “dubins” o “lippb”.

```
roslaunch uuv_control_utils send_waypoints_file.launch uuv_name:=rexrov2 interpolator:=lippb
```

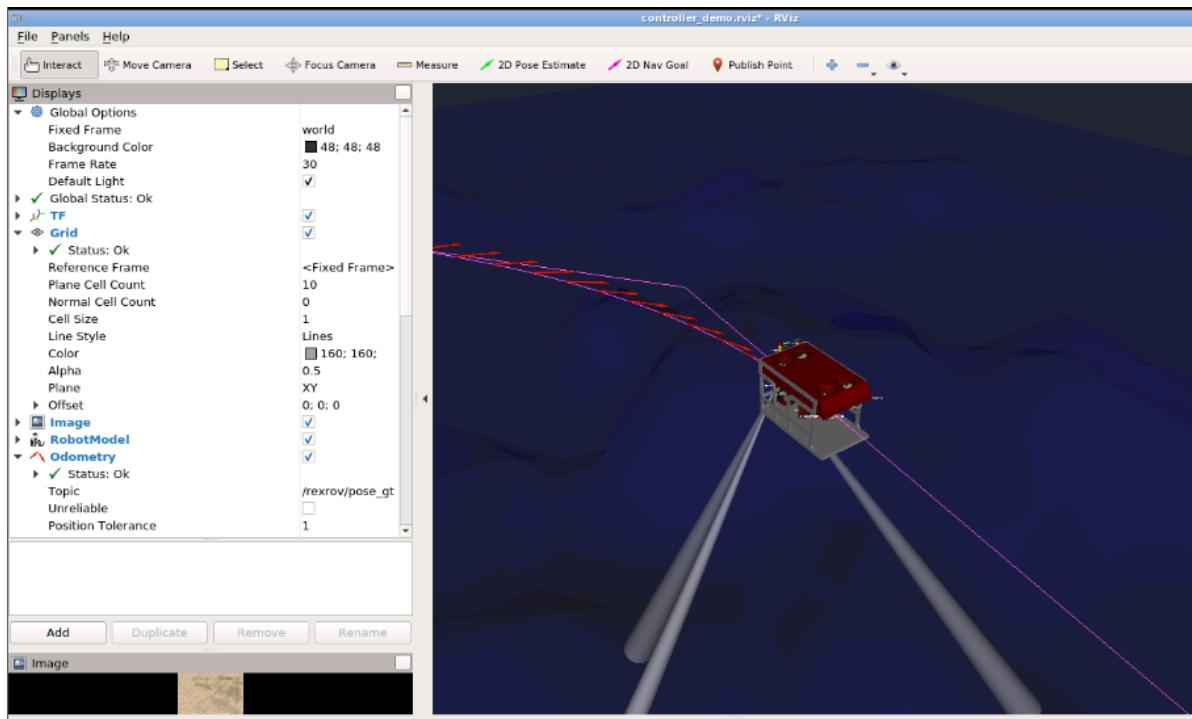


Figura 19. Vista desde RVIZ de la ejecución de una trayectoria lineal mediante waypoints

Utilizando los comandos anteriores se obtiene una simulación del robot RexRov 2 que utiliza un controlador PID. Este controlador tiene en cuenta las perturbaciones de estado estable y corrige los errores de modelado. Además, para la planificación de la trayectoria el paquete “uuv_trayectoy_control” que es capaz de generar la trayectoria mediante la interpolación de los puntos. Además del controlador PID, se pueden usar controladores como el PD con compensación de gravedad.

7. CONCLUSIÓN

En conclusión, se ha podido comprobar que estos robots son capaces de realizar múltiples tareas que antes eran imposibles o demasiado arriesgadas. Además existe una gran variedad de robots submarinos, por lo que se puede escoger entre ellos dependiendo de la aplicación que vaya a desempeñar, la interacción que vaya a crear en el entorno o la autonomía del mismo. Al igual que la elección del robot también es importante el algoritmo que se utiliza para la navegación, el cual depende de la tarea que se quiera realizar así como del estado del entorno.

Dejando a un lado los submarinos militares hemos podido ver algunos ejemplos de modelos innovadores en este ámbito. Algunos son innovadores por motivos diversos: por ser bioinspirados, por aguantar grandes presiones, por poder trabajar atravesando el hielo, por ser casi invisibles, etc. Sin embargo, aún queda mucho por desarrollar ya que estos robots se enfrentan a un entorno que hace más difícil el uso de la tecnología.

En cuanto a la simulación, se ha tenido bastantes problemas con ella debido principalmente a la vaga cantidad de información que hay. Aun así se puede ver como realiza diferentes trayectorias en distintos entornos. En nuestro caso no se ha podido simular como hubiésemos querido ya que teníamos la capacidad restringida al utilizar la plataforma de “The construct sim”.

8. BIBLIOGRAFÍA

- https://digital.csic.es/bitstream/10261/111496/1/Saltaren_R_Robotica_Submarina_Revista_Iberoamericana_Automatica_Informatica_industrial_11_2014_3%20%9319.pdf
- https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/110127/43220496T_TFM_15369251057161086072878319282348.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- https://github.com/uuvsimulator/uuv_simulator
- <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13710/1/108T0320.pdf>
- <https://nmas1.org/news/2017/10/30/motor-magnetohidrodinamico>
- https://cdn.intechopen.com/pdfs/61/InTech-Underwater_robots_part_i_current_systems_and_problem_pose.pdf
- https://www.researchgate.net/publication/298354381_Hybrid_underwater_robotic_vehicles_the_state_of_the_art_and_future_trends
- https://www.researchgate.net/publication/338391338_A_Comprehensive_Review_of_Path_Planning_Algorithms_for_Autonomous_Underwater_Vehicles
- <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4271>
- <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1174/htm>
- https://github.com/uuvsimulator/uuv_simulator
- <https://uuvsimulator.github.io/packages/rexrov2/intro/>
- <https://uuvsimulator.github.io/installation/>