

**UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ
SEDE CENTRAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Licenciatura en Ingeniería mecatrónica
Diseño mecatrónico**

**Diseño de un bote de navegación autónoma asequible para el
monitoreo de la calidad del agua**

PARTICIPANTE:

Jesica Monserrat Ibrahim

8-943-683

FACILITADOR:

Pablo González Robles

CIUDAD DE PANAMÁ, PANAMÁ

2020

Introducción

Los sistemas existentes de navegación y reconocimiento necesitan *Human-in-the-loop (HITL)* o interacciones humanas a la hora de tomar decisiones referentes a evasión de obstáculos, análisis de área, evaluación de amenazas y replanificación de misiones. En las últimas dos décadas, ha habido un creciente interés en el desarrollo de robots autónomos acuáticos. Distintos grupos han creado barcos de vela completamente autónomos, listos para ser desplegados en misiones de recopilación de datos (Meinig et al., 2015) y algunos han sido utilizados para intentar cruzar el océano transatlántico (Ghani y Hole, 2014). Sin embargo, a pesar que la investigación acerca de botes autónomos ha estado creciendo, concentrándose en problemas específicos o genéricos, en general este campo de los vehículos autónomos se encuentra apenas en sus primeras etapas comparado al de los carros o drones.

Una de las áreas que se beneficiaría por utilizar este tipo de tecnología es la de monitoreo de la calidad del agua. Esto es debido a que este trabajo se realiza manualmente y toma un largo tiempo conseguir un par de muestras; sin embargo, si se logra automatizar este proceso se pueden cubrir grandes áreas y conseguir muchas muestras en un corto tiempo. Mientras que esto es cierto existe un pequeño inconveniente el cual es el precio a pagar por obtener, ya sea de cualquier manera, un robot de este tipo. Esto se debe a que pueden llegar a ser bastante costosos. El presente trabajo busca informar al lector sobre en qué consiste un vehículo autónomo acuático y cómo es posible desarrollar uno que sea asequible.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
1. El problema de investigación.....	3-7
1.1. Antecedentes	3-4
1.2. Justificación.....	4-6
1.3. Pregunta de investigación.....	6
1.4. Objetivo general.....	6
1.5. Objetivos específicos.....	6
1.6. Hipótesis.....	7
2. Marco teórico y conceptual.....	7-9
2.1. Los Pilares de los Vehículos Autónomos.....	8-9
3. Metodología.....	10-13
3.1. Tipo de investigación.....	10
3.2. Objetos de investigación.....	10
3.3. Tratamiento de la información.....	10-13
3.3.1. Comparación de Sensores.....	11-12
3.3.2. Cálculo energético.....	12-13
3.3.3. Algoritmos de Machine Learning y Costo Aproximado.....	13
3.4. Instrumentos.....	13-14
3.5. Limitaciones y delimitaciones.....	14-15
3.6. Proyecciones.....	15
4. Bibliografía.....	16
ANEXOS	17

1. El problema de investigación

1.1. Antecedentes

Ha habido un progreso significativo en navegación autónoma por aire y tierra; sin embargo, las tecnologías actuales no aprovechan las oportunidades creadas por la limitación de la navegación acuática actual. Los avances tecnológicos nos han demostrado que es posible la creación de vehículos acuáticos completamente autónomos. Distintos grupos de investigadores han creado barcos de vela autónomos, listos para ser desplegados en misiones de recopilación de datos (Meinig et al., 2015) y algunos han sido utilizados para intentar cruzar el océano transatlántico (Ghani y Hole, 2014).

Los vehículos autónomos presentan avances tecnológicos impresionantes y, a pesar de ser el campo menos experimentado, los acuáticos tienen mucho que ofrecer para mejorar ciertos procesos o actividades que pueden llegar a necesitar muchos recursos o mano de obra. Esto se ve presente en el trabajo de Snyder, Morris, Haley, Collins, Okerholm y Grumman, en el 2004, en el cual desarrollaron un bote con navegación totalmente autónoma, vigilancia y comportamientos reactivos. El grupo de investigadores asegura que “La navegación autónoma de este proyecto fue lograda sin ningún tipo de información o mapas anteriores; por lo tanto, la superficie acuática, los obstáculos en las orillas, objetos móviles y salientes son descubiertos y mapeados en tiempo real usando un arreglo circular de cámaras junto con una cámara de giro y auto inclinación dirigida.” y mencionan que hicieron pruebas en puertos y ríos.

Basándose en ese trabajo, en el 2019, Melo, Mota, Albuquerque y Alexandria presentaron un *paper* de un aerobote para monitoreo de la calidad de agua en los lagos de Fortaleza, Brasil. El aerobote fue desarrollado en la forma de un mini bote, con una estructura de fibra de vidrio y accionado por una minicomputadora

Raspberry Pi, sensores conectados a Arduino y un enrutador Wi-Fi para su conexión a una tableta o computador. Señalan que “La contribución principal de este trabajo fue el desarrollo de un sistema autónomo para adquirir parámetros acuáticos de los distintos puntos del lago”. Ese mismo año, el *MIT* y *AMS Research Teams* presentaron los resultados de sus pruebas del proyecto *Roboat* es un proyecto de investigación de 5 años en el cual estas dos instituciones se unieron para desarrollar la primera flota de buques autónomos para la ciudad de Ámsterdam. Investigan el potencial de la tecnología de auto-conducción para cambiar ciudades y sus aguas navegables. Las plataformas autónomas *Roboat* se combinan juntas para formar puentes flotantes, escenarios, para recolectar desechos, entregar paquetes y transportar personas, todo mientras se recolecta información acerca de la ciudad.

1.2. Justificación

La jefa de la oficina de calidad del agua en el Servicio Geológico de EE.UU. menciona en un artículo la importancia de monitorear la calidad del agua. El artículo menciona que la calidad del agua es necesaria como una medida para conocer las características físicas, químicas, biológicas y microbiológicas del agua y el monitoreo de esta misma ayuda sobremanera a la hora de tomar decisiones sobre temas de salud y ambientales. La República de Panamá no es extraña a tener problemas con la calidad de agua de sus fuentes o en sus cuerpos de agua, tan solo en el 2014 las dos potabilizadoras que abastecen a la Península de Azuero paralizaron operaciones debido a la presencia de atrazina y vinaza en el río La Villa, del cual se abastecían. Aparte de esta situación los ríos de la ciudad capital se encuentran sumamente contaminados, a pesar de que esto mejoró para algunos ríos que fueron limpiados debido a que su contaminación estorbaba los trabajos del saneamiento de la bahía estos no son limpiados ni tratados con la periodicidad necesaria.

Fijándonos en los reportes de calidad de agua de ríos del IDAAN, los cuales se pueden encontrar en el Sistema Nacional de Información Ambiental, nos damos cuenta

que la organización gubernamental hace un monitoreo anual a cada uno de los ríos. La biología acuática Brea Arvidson escribió un artículo sobre la frecuencia con la que se debe monitorear la calidad del agua, la experta asegura que es necesario tener un enfoque proactivo en el cual se tomen muestras durante varias fechas en un solo año. Esto ayuda a comprender los procesos que ocurren en un cuerpo de agua y facilita la predicción de problemas potenciales. Sin embargo, este proceso es realizado, usualmente, de manera manual por un grupo de personas y puede tomar horas cubrir tan solo una zona de un cuerpo de agua, por lo cual un bote autónomo sería una solución ideal.

Una embarcación autónoma presenta un número de ventajas. Primero que nada, presentan una disminución en la mano de obra. El dominio de la superficie acuática es perceptible como “plano” hacia el horizonte o hacia la costa y posee pocos obstáculos. La ubicación de una embarcación es, generalmente, accesible mediante GPS y con sofisticadas técnicas de visualización automatizada, la detección y análisis en tiempo real de objetos transitorios, como botes o escombros flotantes disminuye el número de mano de obra necesaria en una embarcación ya que el sistema reaccionaría y tomaría la decisión en tiempo real, cosa que antes necesitaba aportación humana.

Segundo, debido al avance tecnológico es posible la construcción de robots autónomos funcionales de bajo precio. Esto utilizando microcomputadoras como las Raspberry Pi, acoplándose un microcontrolador o un convertidor digital análogo para recopilar la información de los sensores y con una impresora 3D se puede crear la carcasa de la embarcación a un precio asequible. De hecho, esto ya se ha logrado como parte del proyecto *Roboat*, el cual como se mencionó anteriormente es una colaboración entre *MIT Senseable City Lab* y el *Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions (AMS)*.

Como último punto, otra ventaja que permiten los vehículos autónomos es que si se tienen más de uno se puede ser capaz de utilizarlos de manera colaborativa. Los cuerpos de agua suelen ser de gran extensión, si trabajan de manera colaborativa se

puede cubrir una mayor área en menor tiempo y con menos recursos necesarios, creando un efecto multiplicador de fuerza. Y todo esto puede ser ordenado por un solo operador de manera remota y con conocimiento completo de la situación. Esta forma colaborativa de trabajar de los sistemas autónomos permiten, por ejemplo, evitar el riesgo de colisión entre embarcaciones en los puertos y áreas estrechas, las cuales son extremadamente comunes tanto que tan solo en Europa en los años 2011 a 2016 hubo 18655 colisiones entre embarcaciones, como se muestra en el Anexo 1.

1.3. Pregunta de investigación

¿Qué factores se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un bote autónomo para monitoreo de la calidad del agua?

1.4. Objetivos generales

- Analizar el diseño e implementación de un vehículo acuático autónomo de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua en la Ciudad de Panamá.

1.5. Objetivos específicos

- Comparar los distintos medidores de calidad de agua existentes en el mercado con el fin de escoger el más aventajado.
- Calcular el consumo energético de una embarcación autónoma de pequeño tamaño.
- Seleccionar el modelo de inteligencia artificial adecuado para la automatización del vehículo autónomo.
- Desarrollar una propuesta de diseño de un vehículo acuático autónomo para el estudio de la calidad del agua.

1.6. Hipótesis.

Es posible diseñar y fabricar un bote autónomo a un precio asequible para realizar monitoreos de la calidad de cuerpos de agua en la República de Panamá.

2. Marco teórico y conceptual.

En el libro de Ingemar J. Cox, Lozano-Perez y Gordon T. Wilfong, *Autonomous Robot Vehicles*, los vehículos autónomos son definidos como “vehículos capaces de movimiento inteligente sin necesidad de una guía a seguir o un teleoperador”. En esta investigación el enfoque es hacia los botes autónomos los cuales son generalmente conocidos como vehículos autónomos de superficie no tripulados. Estos se definen como “Un vehículo de superficie que, basándose en las innovaciones de diseño de embarcaciones pequeñas de gran carga útil y alta velocidad y tecnología de sistemas no tripulados, es capaz de satisfacer las extenuantes demandas de las múltiples misiones para las que ha sido programado.”(Yan, Pang, Sun y Pang, 2010).

En la comunidad de vehículos autónomos consideran que existen 6 niveles de autonomía, referirse a la Figura 1 para una visualización gráfica de estos mismos, siendo el último nivel la autonomía completa. Para llegar al último nivel en estos vehículos acuáticos es necesario el uso de algoritmos de Inteligencia Artificial en las áreas de detección de la superficie del agua, estimación de la orilla, detección de objetos, evasión de obstáculos y navegación. Snyder, Morris, Haley, Collins, Okerholm y Grumman presentaron en 2004 un paper investigativo titulado *Autonomous River Navigation* en el cual presentaron la mejor solución para la navegación autónoma en su momento tomando en cuenta todas estas áreas.

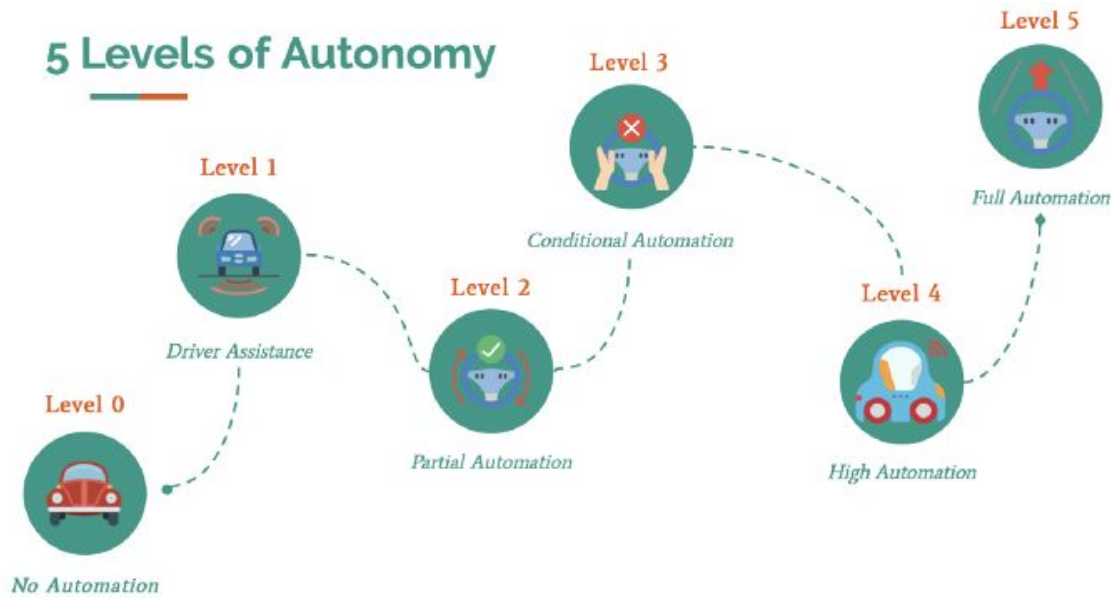


Figura 1. Niveles de Autonomía. Fuente: *Think Autonomous*

2.1. Los Pilares de los Vehículos Autónomos

Existen 4 pilares que, en conjunto, permiten que un vehículo sea autónomo: Percepción, Localización, Planeamiento y Control. Debido a que estos se ven presentes en la arquitectura de software de cualquier máquina autónoma también son una parte fundamental de los botes autónomos. Adoptando el enfoque en el que Snyder, Morris y compañía utilizaron en su ya mencionado *paper*, *Autonomous River Navigation*, podemos visualizar fácilmente estos pilares.

El primer pilar, la percepción se ve presente en la detección de la superficie del agua, específicamente en el flujo óptico y su relación con el movimiento acuático. Este es el primer requerimiento para la navegación en una superficie acuática ya que se necesita determinar, robustamente, donde se encuentra la orilla del cuerpo de agua en relación con la embarcación para así determinar la primera aproximación donde la nave puede moverse. Para esto se utiliza el algoritmo de visión artificial *Harris corner detection*. El mismo funciona buscando esquinas debido a que estas son invariantes en el traslado y rotación, a diferencia de los bordes, estas dos propiedades hacen que las

esquinas sean buenos candidatos para rasgos (features). Primero calcula las derivadas horizontales y verticales (bordes) de una imagen para luego realizar una correlación cruzada entre estos mismos para destacar las esquinas y luego realiza una supresión no máxima (non-maximum) para deshacerse de las características o rasgos de los bordes.

El segundo pilar, localización, consiste en el mapeo y seguimiento de clusters en conjunto con el uso de tecnologías GPS. El sistema de geoposicionamiento nos presenta la información exacta de en qué punto del globo terráqueo se encuentra nuestro sistema. El seguimiento de clusters brindan pistas confiables cuyo movimiento se puede determinar individualmente como estático o en movimiento, y al trabajar en el espacio con aspecto elevado de cámaras superpuestas, los grupos se rastrean naturalmente entre cámaras. El seguimiento de los cluster se realiza mediante un modelo 2D rígido con escala. Cuando se encuentran nuevas características, se agregan al grupo más cercano si su movimiento es compatible con el movimiento 2D de ese grupo. Se utilizan clusters para tener un estimado de la distancia entre el aerobote y los objetos a su alrededor verificando sus movimientos cada cierto tiempo.

Con los primeros dos pilares definidos llegamos al planeamiento, el tercer pilar, se utilizará el sistema de navegación de geo-posicionamiento utilizando *waypoints*, generando así reportes completos que incluyen la trayectoria planeada y la trayectoria que el bote está siguiendo. El último pilar se refiere al control para el cual se utilizará un algoritmo de evasión de obstáculos este toma en cuenta el ángulo de la costa u orilla más cercana y la matriz de sonar visual, observando la ubicación de los obstáculos y ajustando el rumbo si es necesario.

3. Metodología

3.1. Tipo de investigación

Esta es una investigación aplicada tecnológica, descriptiva y cualitativa. En este caso, el objetivo es encontrar estrategias que puedan ser empleadas para el abordaje del problema. El propósito es generar conocimientos que se puedan poner en práctica con el fin de crear un impacto positivo. Es descriptiva porque queremos conocer la naturaleza del proceso de diseño y debido a que no estamos recopilando datos numéricos es considerada una investigación cualitativa en la cual se analizan e interpretan textos existentes referentes al tema.

3.2. Objeto de investigación

El objeto de investigación son los estudios y trabajos de investigación existentes en el campo de botes autónomos. Se presentará y estudiará información pertinente al diseño de vehículos autónomos. Esto incluye pero no está limitado a diseño de la carcasa, arquitectura del software y selección de los materiales.

También se estudiará el mercado para conocer los precios existentes de los distintos materiales necesarios para el proyecto entre estos los sensores, actuadores, fuentes de poder y la unidad central de procesamiento.

3.3. Tratamiento de la información

La información recopilada proviene de textos investigativos publicados por miembros de la comunidad ingenieril, así como

también, información del mercado y de las distintas compañías fabricantes de hardware.

3.3.1. Comparación de Sensores

El primer punto a desarrollar es la CPU, lo que se busca es el diseño de un producto asequible pero se necesita un procesador que sea lo suficientemente potente para la complejidad del programa debido a esto la opción ideal es Raspberry Pi 3 B+, Figura 2 , la última placa de la tercera generación.



Figura 2. Raspberry Pi 3 B+. Fuente: Sitio oficial de Raspberry Pi

La Raspberry Pi 3 B+ no tiene forma de leer entradas análogas debido a que es una microcomputadora completamente digital; sin embargo, esto se puede solucionar fácilmente utilizando un convertidor análogo digital (ADC) externo como el MCP3008 de Adafruit el cual cuesta aproximadamente B/.3.75. Habiendo solucionado ese pequeño problema que presentan las tarjetas Raspberry Pi se necesita comparar los distintos sensores para

saber cuál utilizar. La siguiente tabla presenta la comparación en precios.

Marca	Incluye	Precio
Gravity: KnowFlow Basic Kit	Sensor pH, Sensor EC	B/.199.00
Atlas Scientific ENV-SDS Kit	Sensor de temperatura, Sensor EC, sensor de pH, sensor de oxígeno disuelto, sensor ORP	B/.878.99

Tabla 1. Comparación de sensores para el monitoreo de la calidad del agua.

La Tabla 1 muestra los dos sensores más conocidos que existen en el mercado y que están adaptados para su uso en la robótica. La diferencia de precios entre los dos es muy grande debido a lo que cada uno incluye en su kit. Para probar ambos kits habría que realizar una prueba manual y luego comparar los resultados obtenidos de la prueba manual con los de los kits esto determinaría que sensores funcionan mejor. En caso de que sean los de Atlas Scientific, se puede acortar precios comprando los sensores más importantes para el monitoreo de calidad de agua los cuales son el sensor de pH y el sensor de oxígeno disuelto.

3.3.2. Cálculo energético

Es necesario calcular también el consumo energético de la embarcación y para esto seguimos el modelo presentado en el artículo *Energy Modeling and Power Measurement for Mobile Robots* por Hou, Zhang y Kim en el 2018. Este artículo muestra la

relación entre el sistema de sensores, el sistema de control y el sistema de movimiento. Se pueden utilizar las fórmulas descritas en el *paper* para realizar un cálculo aproximado de la energía consumida.

3.3.3. Algoritmos de Machine Learning y Costo Aproximado

Como se mencionó anteriormente, para crear un vehículo autónomo es necesario utilizar algoritmos de machine learning. El modelo a utilizar debe ser basado en imágenes y el algoritmo de clusters K-Means para que la embarcación sea capaz de reaccionar en tiempo real a cualquier objeto móvil que se encuentre en su radar.

Los botes autónomos para el monitoreo del agua pueden llegar a costar más de mil dólares pero si se hacen algunos ajustes se puede recortar esta enorme cifra a un rango de B/.300 a B/.500.

3.4. Instrumentos

La instrumentación utilizada en esta investigación fue la siguiente:

Lenguaje de programación: Python.

El lenguaje de programación utilizado para programar el bote autónomo será Python. La razón es que Python es un lenguaje de propósito general, es decir se puede utilizar para crear aplicaciones de escritorio o de web, por lo cual la forma en la que se escribe su código es conciso y legible. A pesar que es de propósito general se puede usar para desarrollar aplicaciones científicas y numéricas complejas y ha sido diseñado con características que facilitan el análisis y visualización de datos.

Software

- Fusion 360: es necesario el uso de un CAD/CAM para modelar el diseño escogido. Fusion 360 es un programa de la familia de Autodesk y es una magnífica herramienta a considerar a la hora de diseñar. Tiene una extensa librería de herramientas y es sencillo compartir datos ya que estos se almacenan en la nube, esto agiliza el proceso de diseño.
- Vs Code: Vs Code es un editor de código liviano, extensible y gratuito que se encuentra disponible en todas las plataformas. Realmente el editor a utilizar depende completamente del programador, en este caso VsCode fue escogido debido que a pesar de ser un software gratuito presenta mayores ventajas que PyCharm, al menos que su versión gratuita.
- Circuit.io: Circuit io es una aplicación de diseño de circuitos creada para *makers* o quienes forman parte de la subcultura “hacedora”. Esta herramienta permite realizar circuitos utilizando microcontroladores o microprocesadores famosos en el mercado como Arduino o Raspberry Pi.
- Matlab y Simulink: Matlab es un programa de análisis numérico que ofrece su propio entorno de desarrollo integrado (IDE) con su propio lenguaje (Lenguaje M). Simulink es un entorno de programación visual que funciona encima de Matlab para simular, analizar y modelar sistemas dinámicos. Estas dos herramientas se pueden utilizar para la simulación de vehículos autónomos.

3.5. Limitaciones y delimitaciones

Limitaciones

Originalmente la investigación incluiría una sección sobre conexión de múltiples drones acuáticos para facilitación de las tareas; sin

embargo, debido a la complejidad del tema se acortó al uso de botes autónomos en el área de monitoreo de la calidad de agua.

Como se ha mencionado anteriormente el campo de vehículos autónomos acuáticos no es un campo que se encuentre completamente desarrollado por lo cual la información es bastante limitada y, adicionalmente, el campo del monitoreo de la calidad de agua es usualmente uno en el cual la robótica no se ha implementado a gran escala. Esto resulta en pocos recursos, en especial en el área de los *kits* de prueba en el cual pocas compañías tienen sensores desarrollados específicamente para su uso en el área de la robótica.

Delimitaciones

Esta investigación es solo de carácter informativo, es decir, no abarca el desarrollo del sistema en sí. Esto es debido a que el proceso del desarrollo de un *robot* es un proceso sumamente complejo que puede tomar desde un período tan corto como semanas hasta meses.

3.6. Proyecciones

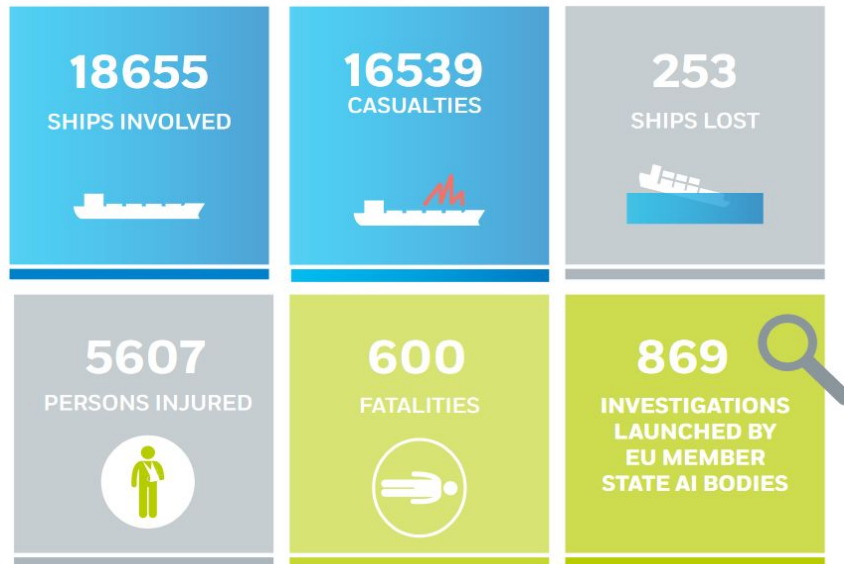
Se abre la posibilidad del desarrollo a futuro de un bote autónomo de bajo costo para el monitoreo de calidad de agua o en áreas similares. Esto permitiría cierto nivel de ampliación en el campo de la navegación autónoma, el cual se encuentra apenas en sus primeras etapas comparado con sus campos hermanos de navegación aérea y terrestre.

Bibliografía

1. Snyder, F. D., Morris, D. D., Haley, P. H., Collins, R. T., & Okerholm, A. M. (2004, December). Autonomous river navigation. In *Mobile robots XVII* (Vol. 5609, pp. 221-232). International Society for Optics and Photonics.
2. Melo, M., Mota, F., Albuquerque, V., & Alexandria, A. (2019). Development of a robotic airboat for online water quality monitoring in lakes. *Robotics*, 8(1), 19.
3. Wang, W., Gheneti, B., Mateos, L. A., Duarte, F., Ratti, C., & Rus, D. (2019, November). Roboat: An Autonomous Surface Vehicle for Urban Waterways. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6340-6347). IEEE.
4. Myers, D. N. Why monitor water quality? Visitado el 29 de Octubre de 2020, <https://water.usgs.gov/owq/WhyMonitorWaterQuality.pdf>
5. Arvidson, B. (2017, April 13). How Often Should Water Quality be Tested? Visitado el 29 de Octubre de 2020, <https://www.solitudelakemanagement.com/blog/how-often-should-water-quality-be-tested>
6. Lozano-Perez, T., Cox, I., Wilfong, G.(2012). *Autonomous robot vehicles*. Springer Science & Business Media.
7. Yan, R. J., Pang, S., Sun, H. B., & Pang, Y. J. (2010). Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 9(4), 451-457.
8. Hou, L., Zhang, L., y Kim, J. (2019). Energy modeling and power measurement for mobile robots. *Energies*, 12(1).

ANEXOS

Anexo 1: Resumen anual de siniestros e incidentes marítimos en Europa en el 2017



Fuente: *European Maritime Safety Agency (EMSA)*