

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS FIJOS Y MÓVILES PARA UN VEHÍCULO DE SUPERFICIE.



Ing. Alcides Ramos Zambrano.

Trabajo de grado
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director:
Ing. Juan Contreras Montes, PhD

Universidad del Cauca
En convenio con
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" - Cartagena
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Comunicaciones

Cartagena, Junio de 2021

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS FIJOS Y MÓVILES PARA UN VEHÍCULO DE SUPERFICIE.

Ing. Alcides Ramos Zambrano

Trabajo de grado para la obtención del título de:

Magister en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director:
Ing. Juan Contreras Montes, PhD

Universidad del Cauca
En convenio con
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" - Cartagena
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Comunicaciones

Cartagena, Junio 2021.

Hoja de Aprobación.

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a todos los que siempre me han apoyado e impulsado,

Amigos y familiares, principalmente a mis padres que siempre han creído en mí.

Agradecimientos.

Llevar a feliz término este trabajo, es el resultado del aporte de muchos granos de arena, que siempre me impulsaron y creyeron en mí.

Primero agradezco a Dios y la Virgen, por su apoyo espiritual y esencial para la finalización de trabajo.

A mis familiares, padres, hermanos, conyugue, hija y todos esos amigos y amigas que siempre están presente en los momentos buenos y malos de mi vida, dándolo todo para que siempre se cumplan mis metas.

A mi director, el Doctor Juan Contreras por su paciencia, y enseñanzas y asesorías, esenciales para culminar este logro en mi vida.

A mi gran Amigo, William Cuadrado, que siempre me impulsó, y ayudó a enfocar la meta trazada.

Agradecer a la Universidad del Cauca y a la Escuela Naval por darme la oportunidad de estudiar esta maestría.

Al Ingeniero Alejandro Toledo Tovar, Coordinador del Programa de Maestría en Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, su paciencia, tolerancia, comprensión y disposición, siempre me alentaron a llegar hasta estas instancias.

Cartagena, febrero 2021

Resumen.

El corazón de un vehículo de superficie no tripulado (USV), consta de un sistema embebido multi-sensor, capaz de fusionar eficientemente los datos de sensores y controlar los actuadores principales. El sistema de piloto automático y la navegación autónoma se logran mediante el uso de una gran variedad de sensores y actuadores, como acelerómetros, giroscopios, magnetómetros, GPS, motores brushless y servomotores. El uso de Algoritmos optimizados, para la evasión de obstáculos móviles y fijos, así como el reconocimiento del entorno permite y la toma de decisiones, permiten la implementación de un sistema completamente autónomo. Este trabajo tiene como objetivo implementar el hardware y el software para un vehículo de superficie no tripulado, con especial énfasis en un algoritmo optimizado para la evasión de obstáculos que completamente las capacidades del piloto automático.

El Firmware desarrollado optimiza el uso del sistema embebido para concentrar la potencia y el poder del procesador en la fusión de datos de sensores y en el proceso de toma de decisiones necesarios para la implementación del algoritmo de evasión de obstáculos, esto se logra usando varias interrupciones y acceso directo a memoria (DMA), para la comunicación y adquisición de datos, cuando sea necesario, descargando al procesador y dar más prioridad a la ejecución del algoritmo de evasión de obstáculo..

Palabras Clave: USV, Evasión obstáculos, autopiloto, lógica difusa, sistema embebido.

Abstract.

A robust multi-sensor embedded system, able to effectively fusion raw data and control the main actuators, is the heart of an unmanned surface vehicle (USV). Autopilot system and autonomous navigation are achieved by using a great variety of sensors and actuators, such as accelerometers gyroscopes, magnetometers, GPS, brushless motors and servomotors. Advanced optimized algorithms to implement the avoidance of mobile and stationary obstacles, as well as the environment recognition and decision making of the vehicle, enable the realization of fully autonomous systems. This work aims to implement the hardware and software for an unmanned surface vehicle, with special focus on an advanced optimized obstacle avoidance algorithm to support the autopilot capability.

The developed firmware optimizes the use of the embedded system in order to focus the power and resources of the main processor to the sensor data fusion and decision-making process needed for the implemented obstacle avoidance algorithm. This feature is enabled by using a variety of interruptions and direct memory access (DMA) to communication and data acquisition, when needed. offloading the processor and giving more priority to the execution of the obstacle avoidance algorithm.

Key words: USV, Obstacle avoidance, Autopilot, Fuzzy Logic, Embedded system.

CONTENIDO.

CONTENIDO.....	9
LISTA DE TABLAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	14
1. INTRODUCCIÓN.	16
1.1. Formulación del Problema.	16
1.1.1. Planteamiento del problema.	16
1.1.2. Justificación.	16
1.1.3. Marco Teórico.....	17
1.2. Estado del arte.	27
1.3. Aporte investigativo del proyecto.	30
1.4. Objetivos.	31
1.4.1. Objetivo general.....	31
1.4.2. Específicos.	31
1.5. Propuesta.....	31
2. CARACTERISTICAS Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA A DISEÑAR.	32
2.1. Hardware.	32
2.1.1. Microcontrolador.	32
2.1.2. Sensores.....	32
2.1.3. Actuadores.....	32
2.1.4. Comunicación.	33
2.1.5. Almacenamiento.	33
2.1.6. Alimentación.	33
2.1.7. PCB.	33
2.2. Software.....	33
2.2.1. Firmware.....	33
2.2.2. Software en el PC.....	34
2.2.3. Compilador.	34
3. DISEÑO DEL SISTEMA.....	35

3.1. Selección de los componentes USV.	36
3.1.1. Sensores.	36
3.1.2. Microcontrolador.	39
3.1.3. Comunicaciones.	41
3.1.4. Alimentación.	41
3.1.5. Otros dispositivos.	41
3.2. Software.	41
3.2.1. Compilador.	42
3.2.2. Software del PC.	42
4. DISEÑO DEL SISTEMA.	43
4.1. Hardware.	43
4.2. Firmware.	46
4.2.1. Interrupciones de recepción en el puerto USART.	46
4.2.2. Canales DMA.	47
4.2.3. Módulo INPUT CAPTURE,	47
4.2.4. Salida PWM.	47
5. MODELO MATEMÁTICO DEL USV.	49
5.1. Identificación difusa.	49
5.2. Modelo Nomoto.	62
6. ALGORITMOS DE EVASIÓN DE OBSTACULOS.	65
6.1. Análisis de los algoritmos implementados.	68
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	69
7.1. Conclusiones.	69
7.2. Recomendaciones.	70
BIBLIOGRAFÍA.	71
ANEXO A.	74
ANEXO B.	97
ANEXO C.	98
ANEXO D.	113

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Selección sensores Ultrasónicos	38
Tabla 2. Comparación entre microcontroladores	40
Tabla 3. Característica del USV	49

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Forma Típica de una Curva Evolutiva	21
Figura 2. Alternativas para modelar la dinámica de un sistema.....	22
Figura 3. Técnicas de identificación de sistemas.....	23
Figura 4. Fuente propia del autor	35
Figura 5. Tabla de GPS serie 6 de ublox.....	36
Figura 6. Comparación IMU.....	37
Figura 7. Lóbulo de emisión del sensor MB7072.....	38
Figura 8. Arreglo de sensores ultrasónicos.....	39
Figura 9. Sistema de redundancia.....	40
Figura 10. Estación en tierra.....	42
Figura 11. Diagrama esquemático.....	43
Figura 12. Configuración de las cuatro capas	44
Figura 13. Diseño del PCB.....	44
Figura 14. PCB implementada.....	45
Figura 15. Tarjeta PCB con conexiones.....	45
Figura 16. USV ENAP.....	46
Figura 17. Firmware.....	48
Figura 18. Circulo evolutivo.....	51
Figura 19. Maniobra de zig-zag $10^{\circ}/-10^{\circ}$	52
Figura 20. Prueba Zig-Zag $\pm 5^{\circ}$	56
Figura 21. Prueba Zig-Zag $\pm 10^{\circ}$	56
Figura 22. Prueba Zig-Zag $\pm 20^{\circ}$	57
Figura 23 Pruebas en la piscina.	57
Figura 24. Particiones difusas de las variables de entrada	60

Figura 25. Respuesta del buque con controlador difuso ante solicitudes de cambio de rumbo	64
Figura 26. Simulación en Matlab	66
Figura 27 y 28. Buque real navegando.....	67
Figura 29. Diagrama de flujo del algoritmo de evasión	68

LISTA DE ABREVIATURAS.

USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>	Vehículo de Superficie no Tripulado
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>	Procesador Digital de Señales
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>	Unidad de Medición Inercial
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Sistema de Posicionamiento Global
DMA	Direct Memory Access	Acceso Directo a Memoria
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>	Controlador Digital de Señales
CLR	<i>Clear</i>	Borrar
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Modulación por Ancho de pulso
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>	Proporcional Integrar Derivativo.
PI	<i>Proportional Integral</i>	Proporcional Integral
FLS	<i>Fuzzy Logic System</i>	Sistema de Lógica Difusa
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Tiempo
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>	Asociación Nacional de Electrónica Marina
COLREG	International Regulations for Preventing Collisions	Regulación Internacional para prevenir Abordaje.
DIMAR	<i>Maritime General Directorate</i>	Dirección Gen eral Marítima

ESC	<i>Electronic Speed Control</i>	Controlador Electrónico de Velocidad
PPS	<i>Peripheral Pin Select</i>	Pin de Periférico Seleccionable
CCP	<i>Module Capture Compare</i>	Módulo de Comparación y Captura
USART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>	Trasmisor-Receptor Universal Asincrónico
MIPS	<i>Millions of Instructions per Second</i>	Millón de Instrucciones por segundo
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>	Amarre Por fase
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>	Detección por Luz y Distancia
ENAP	<i>Almirante Padilla Naval School</i>	Escuela Naval Almirante Padilla

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Formulación del Problema.

1.1.1. Planteamiento del problema.

La Armada Nacional ha incursionado en el desarrollo de vehículos no tripulados de superficie que apoyen las operaciones marítimas con el fin de ampliar el rango o capacidad de reconocimiento, vigilancia e interdicción. La Escuela Naval “Almirante Padilla” en convenio con COTECMAR (Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, marítima y fluvial), se encuentran desarrollando un prototipo de Vehículo de Superficie no tripulado que cumpla con dicho requerimiento.

Sin embargo, la operación autónoma de estos vehículos se enfrenta a problemas asociados no solo con las perturbaciones propias del medio marino sino con la alta posibilidad de colisiones con otras embarcaciones, elementos flotantes o estructuras marinas, entre otros.

Uno de los objetivos de la Armada Nacional es el desarrollo de tecnología propia, de bajo costo, que le permita desligarse de la dependencia tecnológica, la cual, en el ámbito militar, puede representar una amenaza a mediano a largo plazo.

El proyecto busca implementar en el vehículo autónomo de superficie desarrollado en la Escuela Naval Almirante Padilla un sistema de monitoreo permanente del medio en el cual navega el vehículo, que ejecute acciones sobre el timón y la propulsión para evitar colisiones siguiendo las normas establecidas por la Organización Marítima Internacional OMI contempladas en el reglamento internacional denominado COLREG (Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea). Por tal motivo se desarrollarán algoritmos dentro de un sistema embebido que mediante sensores de bajo costo como son: sensores ultrasónicos, GPS embebidos, sensores inerciales (IMU), entre otros doten al USV de la capacidad de evasión de obstáculos fijos y móviles.

1.1.2. Justificación.

Existe una enorme brecha tecnológica, entre los países desarrollados y los que se encuentran en vía de desarrollo como Colombia, la opción más cómoda muchas veces es pagar y adquirir la tecnología, pero en el área militar eso representa una desventaja

estratégica; La Escuela Naval Almirante Padilla en su programa de posgrado posee la Ingeniería Naval, y la Ingeniería Electrónica, más un grupo de investigación el GICCDN (Grupo de Investigación en Comunicación, Control y Diseño Naval), es decir cuenta con el personal, instalaciones y logística necesaria para poder desarrollar un vehículo de superficie no tripulado propio, y poder usarlo para probar algoritmos, como los que competen en este trabajo, relacionado con la evasión de obstáculos fijos y móviles.

El presente trabajo de grado busca aportar al desarrollo de una tecnología propia de la Armada Nacional de Colombia, en los relacionado a los vehículos de superficie no tripulados, centrándose en este caso, en los algoritmos de evasión de obstáculos fijos y móviles.

1.1.3. Marco Teórico.

1.1.3.1. Microcontrolador.

El Cerebro detrás de un Vehículo de superficie no tripulado, es un sistema embebido, que no es más que un CHIP programable, que integra hardware, como puertos, periféricos, memoria, etc. normalmente formado por un microcontrolador y en el mercado se encuentran desde 8 bits a 32 bits, desde 6 pines a cientos de pines, y múltiples periféricos y puertos de comunicación o control.

Entre las empresas líderes en la fabricación de microcontroladores tenemos a Microchip¹, StMicroelectronics² y Texas Instruments³, las cuales cuentan con microcontroladores con características de DSP, que son los recomendables en los USV.

Los MIPS, es la unidad de medida de muchos microcontroladores, y hace referencia al número de instrucciones que puede realizar en 1 Segundo, medida en millones de instrucciones por segundo. Sin embargo los MIPS, eran muy ambiguos, porque las instrucciones, depende el ensamblador de cada microcontrolador y no se referencia un tipo de instrucciones específicas, por lo cual en microcontroladores con capacidad de DSP, se utiliza el DMIPS⁴, que quiere decir millones de instrucciones tipo Dhrystone, pero al no ser un estándar y depender , esta vez mucho del compilador utilizado, así como por tener poco instrucciones de punto flotante, ha sido actualmente reemplazado por un sistema de medición de velocidad más equitativo y comparativo entre los diferentes fabricantes de microcontroladores como es el CoreMark⁵ , que

¹ <https://www.microchip.com/>

² https://www.st.com/content/st_com/en.html

³ <https://www.ti.com/>

⁴ A. Ltd, "Benchmarking in context: Dhrystone," ARM White Paper, pp. 1-7, 2002.

⁵ <https://www.eembc.org/coremark/>

permíteme en su algoritmo utilizar funciones de lista, y punto flotante, como matriciales también.

1.1.3.2. Compilador.

Es un software que convierte un lenguaje de alto nivel a otro de más bajo nivel⁶, por ejemplo, de C++ a código máquina en un microcontrolador, el programa convertido de extensión ".hex", ese código máquina que se pasará al microcontrolador recibe el nombre de firmware.

1.1.3.3. Motores.

El tipo de motor eléctrico utilizados en USV, es un motor DC sin escobillas o motores Brushless⁷, debido a alto torque y velocidad, y dentro de los brushlees el más usado son los outrunners donde embobinado está en el eje y los imanes pegados a la carcasa, Además qué, para los vehículos de superficie no tripulado, existen motores brushless especiales con refrigeración por agua⁸.

1.1.3.4. Controlador de Velocidad ESC.

El motor Brushless para su control necesita 3 señales de potencia, desfasada 120° grados una de la otras⁹, pero para facilitar la señal de control al microcontrolador existen Drivers o ESC (Controlador electrónico de Velocidad), el cual permite que la velocidad y giro el motor Brushless se controle con una simple señal PWM, como su fuera un servomotor más del sistema.

1.1.3.5 Señal PWM.

La señal de modulación de ancho de pulso, es ampliamente utilizada en electrónica, tanto como en entrada de sensores como en salida para actuadores, en cuanto a un USV se refiere, esta señal es usada para que el controlador detecte señales directas del receptor de radiocontrol y también para muchos sensores de distancias, útiles para implementar la evasión de obstáculos fijos y móviles como son los sensores ultrasónicos y los LIDAR. En cuanto a señales de Salida de control se utiliza para el control de los servomotores de timos, giro de cámara, y controlar los drivers de velocidad o ESC de los motores de propulsión

⁶ <https://www.ictea.com/cs/index.php?rp=/knowledgebase/8817/iQue-es-un-programa-compilador.html>

⁷ https://www.sunrisemotor-cn.com/product_category/Brushless-DC-Motor.html?gclid=CjwKCAjwlrqHBhByEiwAnLmYULuW-AnvA8nfOuGbAgwL_dYsMZBWOQZXYNocjz3mHKbszxp03RPOpxoCi08QAvD_BwE

⁸ https://hobbyking.com/es_es/turnigy-aquastar-2842-2800kv-water-cooled-brushless-outrunner-motor.html?__store=es_es

⁹ O. Becerra, Artist, Control de Motor sin Escobillas. [Art]. Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga, 2011.

1.1.3.6. Sensores de distancia.

Entro los sensores de distancia más utilizados en los USV, y que son indispensables para la implementación d ellos algoritmos de evación de obstáculos fijos y móviles están¹⁰.

1.1.3.6.1. Sensores Ultrasónicos: Su principio básico es el transmitir una onda sonora fuera del espectro audible, y detectar el eco de la mismo, su implantación en sencilla, y se tiene una precisión aceptable, su desventaja es un alcance limitado, normalmente inferior a 15mts.

1.1.3.6.2. Sensores LIDAR: LIDAR o Light Detection and Ranging, son sensores ópticos, que utilizan tecnología láser, para determinar el tiempo de vuelo de regreso de un haz de luz, y así la distancia; es una tecnología moderna, de alta precisión y su única desventaja es que se puede ver afectado en cierta medida por la luz ambiente.

1.1.3.7. COLREG (International Regulations for Preventing Collisions at Sea - 1972).

Normas Publicadas por la Organización Marítima Internacional, establecen las “reglas de camino” o de navegación que deben observarse por los buques y otras embarcaciones en el mar, para prevenir abordaje entre dos o más embarcaciones.¹¹

1.1.3.8. Navegación autónoma.

La navegación autónoma implica que un vehículo es capaz de planear su trayectoria y ejecutar este plan sin intervención humana. En algunos casos ayudas de navegación remota se utilizan en el proceso de planeamiento, en otras ocasiones la única información disponible para computar una ruta está basada en las entradas de sensores a bordo del vehículo. Un robot autónomo es aquel en el que no solo se puede mantener su propia estabilidad mientras se mueve, sino que también puede planear sus movimientos. Algunos robots usan ayudas a la navegación, pero también pueden utilizar ayudas visuales, auditivas, entre otras. Una vez se obtiene la información básica de posición en forma de señales trianguladas o por percepción del ambiente, la “inteligencia” de la máquina debe aplicarse para transformar alguna motivación básica (razón para dejar la posición actual) en una ruta y plan de movimiento. Este plan debe acomodarse a las intenciones comunicadas por parte de otros robots autónomos en

¹⁰ <https://www.sensorpartners.com/en/knowledge-base/distance-measurements-choosing-laser-or-ultrasonic-sensors/>

¹¹ <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/COLREG.aspx>

orden de prevenir colisiones, mientras considera la dinámica propia de movimiento del robot.¹²

1.1.3.9. Pruebas estándar de maniobrabilidad.

Para valorar la maniobrabilidad de un buque, la OMI (MSC/Circ.1053) establece pruebas estándares, como la prueba de círculo evolutivo, a las dos bandas con ángulo de timón de 35°, y la prueba de zigzag 10/10 y 20/20, en las cuales se aplica un ángulo de timón de manera alternativa hasta que se alcanza una desviación de la proa o rebasamiento y finalmente, prueba de parada. A continuación, se explica brevemente en qué consisten las pruebas que se tendrán en cuenta en el desarrollo de este trabajo.

1.1.3.9.1. Prueba Círculo De Evolución: Es una prueba que se realiza y que permite identificar el modelo del USV, la cual consiste en girar unos cuantos grados el timón y dar marcha, avante para que el vehículo de superficie describa el círculo de evolución. En el análisis de la curva de evolución se debe tener en cuenta las siguientes tres fases:

- **Fase de maniobra:** esta fase se caracteriza por ser en la que se ejecuta el cambio del ángulo del timón, va desde la primera variación del timón hasta el ángulo final el cual se estableció para ejecutar la curva de evolución.
- **Fase de evolución:** durante esta fase se mantiene el ángulo del timón constante, no se mantienen constantes las fuerzas que actúan sobre el buque manteniéndolo variable.
- **Fase uniforme:** en esta fase se mantiene el equilibrio dinámico del buque y termina cuando se varía la velocidad o el ángulo del timón.

1.1.3.9.2. Características de la curva de evolución: Para el círculo evolutivo en embarcaciones pequeñas se recomienda variables como viento y marea no afecten el comportamiento dinámico del buque, en la figura (1) se muestra a gráfica que representa la forma típica de la curva evolutiva.

¹² **Robert C. Michelson**, Principal Research Engineer, Georgia Tech Research Institute, Adjunct Associate Professor, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, Smyrna, Georgia <http://accessscience.com>, Copyright The McGraw-Hill Companies. All Rights reserved.

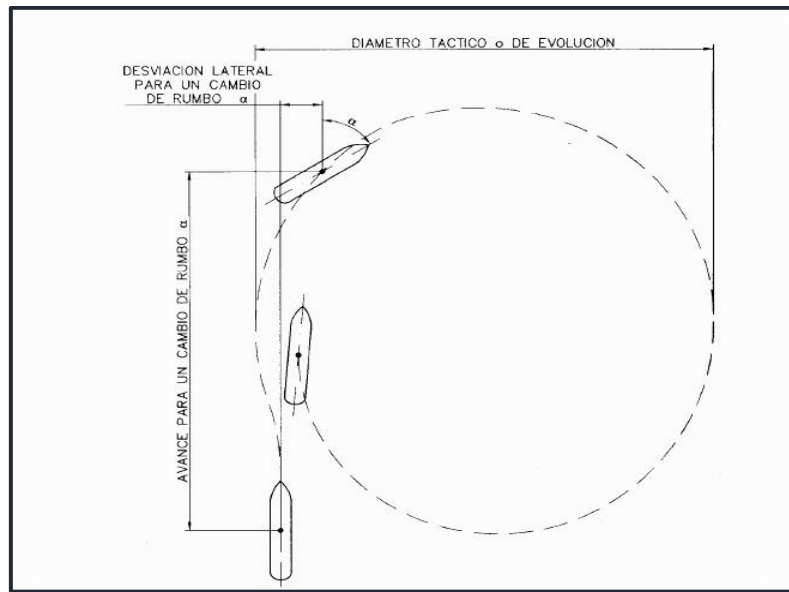


Figura 1. Forma Típica de una Curva Evolutiva
Fuente: www.puertos.es/export/ROM3199PARTE_6.pdf, p 176

La curva de evolución presenta consigo una serie de parámetros que permiten caracterizar el desempeño del buque, entre estos están:

- Avance: Es la distancia que se desplaza el centro de gravedad de un buque en dirección del rumbo original desde que se efectúa el cambio en la pala del timón.
- Desviación lateral: Es la distancia que se desplaza el centro de gravedad de un buque en dirección perpendicular al rumbo original, desde que se efectúa el cambio en la pala del timón.
- Diámetro táctico o de evolución: *“Es la mayor distancia obtenida proyectando la curva evolutiva sobre la normal al rumbo inicia”*¹³.
- Diámetro final o de rotación: *“Es el diámetro de la curva evolutiva durante el período uniforme, es decir cuando la trayectoria se hace prácticamente circular”*¹⁴.

¹³ “Navegación y Maniobras de Buque” parte 6, pp 176-180
http://w3.puertos.es/export/download/ROM_PDFs/ROM3199PARTE_6.pdf pp177

¹⁴ “Navegación y Maniobras de Buque” parte 6, pp 176-180
http://w3.puertos.es/export/download/ROM_PDFs/ROM3199PARTE_6.pdf pp178

1.1.3.9.3. Prueba del Zigzag: Para realizar una prueba de zigzag en un buque se debe iniciar alternando la inclinación del timón hacia ambos costados con un mismo grado (d°), logrando un cambio (Ψ°) con respecto al rumbo inicial o de partida, este procedimiento se debe realizar a máxima velocidad, pero con el fin de obtener diferentes respuestas se puede realizar otras pruebas diferentes velocidades.

1.1.3.10. Modelamiento de la dinámica del buque.

El modelo matemático que describe la dinámica de un sistema puede ser obtenido: a) Mediante la aplicación de principios analíticos y/o físicos: leyes de Kirchoff, leyes de Newton; b) A partir del análisis de datos experimentales de entrada y salida del sistema a modelar (Identificación).

En la figura 2 se aprecia las diferentes alternativas para modelar la dinámica de un sistema.

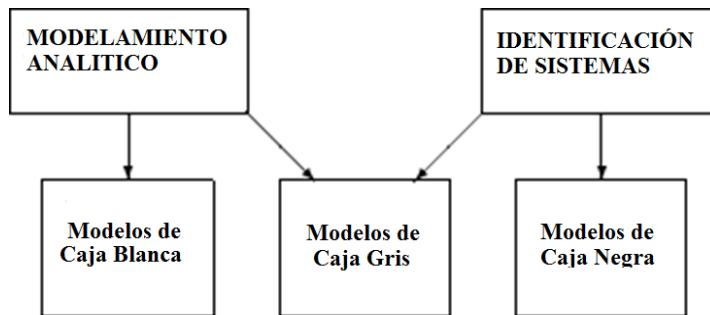


Figura 2. Alternativas para modelar la dinámica de un sistema.

La técnica de modelamiento por identificación de sistemas, ha sido la empleada en este proyecto. Se entiende por identificación de sistemas a la obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio.

La figura 3 describe lo modelos que se pueden obtener del proceso de identificación y las técnicas empleadas para cada caso.

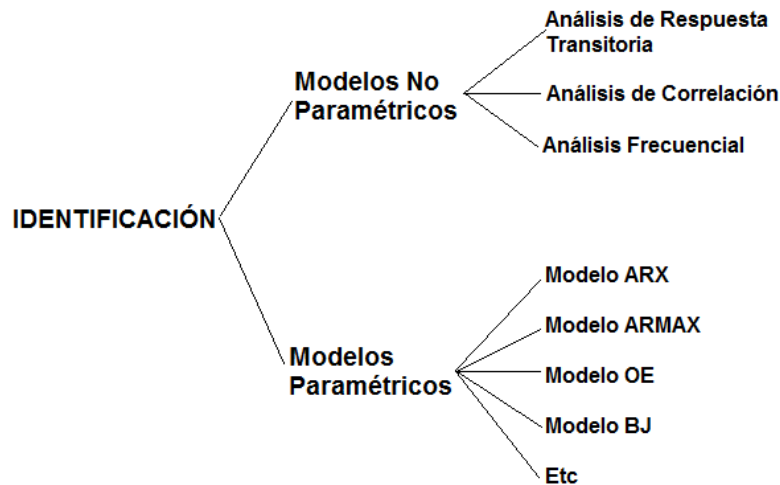


Figura 3. Técnicas de identificación de sistemas.

El proceso de identificación comprende, básicamente, los siguientes pasos:

- a. Obtención de datos de entrada y salida: Es necesario conocer bien el ancho de banda del sistema para generar una apropiada señal de excitación (entrada) y definir un adecuado tiempo de muestreo.
- b. Procesamiento de los datos: Eliminación de ruidos e imperfecciones en los datos.
- c. Elección de la estructura del modelo: En el caso de modelos paramétricos se debe definir el orden del modelo y el número de parámetros.
- d. Obtención de los parámetros del modelo: Se estiman los parámetros de la estructura que mejor se ajusta a la respuesta real del modelo ante los datos de entrada.
- e. Validación del modelo: Mediante una métrica del error se calcula la precisión del modelo (respuesta del modelo vs respuesta del sistema real). Si el modelo no es muy preciso, se deben revisar los siguientes aspectos:
 - Mirar si la señal de excitación es adecuada.
 - Es posible que la estructura del modelo que se escogió no proporciona una buena descripción del modelo.
 - Puede que el criterio de ajuste de parámetros empleado no sea el adecuado.

Para desarrollar un modelo matemático de un sistema dinámico como el que se pretende aplicar en el USV se definirán un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o al menos, bastante aproximada, en el caso de prototipos o unidades de navegación se han realizado estudios y se han determinado ciertas ecuaciones que describen el desempeño y el comportamiento para sistemas de navegación como lo son las ecuaciones de Nomoto¹⁵. Se debe tener en cuenta que obtener un modelo matemático razonable es la parte más importante de todo el análisis¹⁶, ya que de esto depende la obtención de buenos resultados mediante el uso de recursos analíticos como software donde se pueden estudiar y sintetizar los datos.

El modelo de Nomoto de segundo orden está dado por la expresión:

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{\frac{KT_3}{T_1T_2}\left(s+\frac{1}{T_3}\right)}{\left(s+\frac{1}{T_1}\right)\left(s+\frac{1}{T_2}\right)} \quad (1)$$

Donde Ψ representa el ángulo de guiñada o rumbo y δ representa el ángulo de timón. Descomponiendo en fracciones parciales y resolviendo, tenemos que:

$$\psi(t) = \frac{K(T_1-T_3)}{T_1(T_1-T_2)} * e^{-\frac{1}{T_1}t} + \frac{K(T_2-T_3)}{T_2(T_2-T_1)} * e^{-\frac{1}{T_2}t} \quad (2)$$

En el dominio de Z tenemos:

$$G(z) = \frac{A_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1}\right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_1}T} z^{-1}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1}\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{T_1}T} z^{-1}\right)} \quad (3)$$

$$G(z) = \frac{A_1 + A_2 - \left(\left(A_1 * e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1}\right) + \left(A_2 * e^{-\frac{1}{T_1}T}\right) \right) z^{-1}}{1 - \left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T} \right) z^{-1} + e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)T} z^{-2}} \quad (4)$$

¹⁵ J.M.J. Journée and J.A. Pinkster, SHIP HYDROMECHANICS Part I Introduction, Delft University of Technology, College MT511-d4, 2001, Pag 89

¹⁶ Katsuiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, III Edición, Cap 3.1, pp 57-60, 1998.

Donde T es el tiempo de muestreo, y:

$$A_1 = \frac{K(T_1 - T_3)}{T_1(T_1 - T_2)}; \quad A_2 = \frac{K(T_2 - T_3)}{T_2(T_2 - T_1)}$$

Haciendo analogía con un modelo discreto de segundo orden expresado por la siguiente ecuación:

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (5)$$

Tenemos que:

$$b_0 = A_1 + A_2$$

$$b_1 = -\left(A_1 * e^{-\frac{1}{T_2}T} + A_2 * e^{-\frac{1}{T_1}T}\right)$$

$$a_1 = -\left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T}\right)$$

$$a_2 = e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)T}$$

A partir de los cuales se pueden obtener los coeficientes del modelo de Nomoto de segundo orden, K, T₁, T₂ y T₃, así:

$$T_2 = \frac{T}{-\frac{T}{T_1} - \ln(a_2)} \quad (6)$$

Si hacemos:

$$a_1 * e^{-\frac{1}{T_1}T} = -\left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T}\right) * e^{-\frac{1}{T_1}T} \quad (7)$$

Tendremos que:

$$a_2 * e^{\frac{2T}{T_1}} + a_1 * e^{\frac{T}{T_1}} + 1 = 0 \quad (8)$$

Y:

$$T_1 = \frac{T}{\ln(x_{1,2})} \quad (9)$$

Donde:

$$x_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4(a_2)(1)}}{2 * a_2} \quad (10)$$

El coeficiente K se calcula a partir de la ganancia del modelo en tiempo discreto ($z = 1$), así:

$$K = \frac{b_0 + b_1}{1 + a_1 + a_2} \quad (11)$$

Y el coeficiente T_3 mediante:

$$T_3 = \frac{b_0 T_1 T_2}{K} \quad (12)$$

Las anteriores ecuaciones permiten obtener el modelo de Nomoto a partir de datos experimentales; es decir, se obtiene un modelo de caja gris.

No obstante, los resultados mostraron que el mejor modelo obtenido (mayor precisión) se alcanzó utilizando la técnica de identificación difusa, que se muestra a continuación:

1.1.3.11. Algoritmo de campo de fuerzas virtuales.

Es un algoritmo básico, pero de gran potencial que permite de manera certera realizar la evasión de objeto tanto fijos como móviles. La teoría del Campo de Fuerzas Virtuales descrita por Borenstein y trabajada por otros autores¹⁷ en donde el equipo móvil experimenta una atracción hacia su meta, en este caso un *waypoint* final o rumbo, así mismo experimenta una fuerza de repulsión asociada a los obstáculos que detecta durante la navegación. La atracción y repulsión son modelados como vectores que representan fuerzas virtuales a las que se ve sometido el equipo móvil, donde dichos vectores poseen una magnitud y un ángulo relativo al sistema mismo.

¹⁷ B. KOREN, "The Vector Field Histogram- Fast," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 7, no. 4, pp. 535-549, 1991.

Existe un algoritmo modificado, que permite mejorar la detección de objetos móviles, usando un algoritmo modificado, es decir, la MVFF (campo Modificado de Fuerza Virtual) método que permite desarrollar el control necesario y requerido para la evasión de obstáculos ya sean fijos móviles. El algoritmo incorpora dos principales parámetros de índice de refracción α y β , así como un modo S, proporcionando de este modo un cierto nivel de flexibilidad en la selección del modo de mantenimiento de la pista a usar por parte del prototipo¹⁸.

1.2. Estado del arte.

Desde la segunda guerra mundial se han presentado los primeros dispositivos USV's, desplegados como prototipos y basados en tecnologías limitadas por lo que el desarrollo de su navegación se efectuaba en línea recta y bajo ninguna operación por parte del controlador humano, este dispositivo fue bautizado bajo el nombre de COMOX (1994) por parte de investigadores canadienses. Así mismo en diversas armadas del mundo se desarrollaron dispositivos de limpieza de minas de superficie, pero su principal desventaja era que no se podían concebir bajo el concepto de vehículos autónomos, ya que estos no podían describir rutas predeterminadas y no contaban con la inteligencia artificial que le permitiesen efectuar cálculos de trayectorias en tiempo real¹⁹.

En la década de los 90's con el desarrollo del RMS (Remote Mine-hunting System - sistema remoto para remoción de minas) primer prototipo verdadero del vehículo autónomo, una evolución del bote cazaminas canadiense, imponiéndose en el escenario naval los dispositivos USV's con la asignación de tareas peligrosas en conflictos armados complejos como la guerra del golfo y Afganistán, en las cuales estos dispositivos marcaron una diferencia importante en el desarrollo de tareas sensibles y protección de las unidades navales²⁰.

Los sistemas autónomos supervisados tienen la capacidad de monitorear el ambiente²¹ donde operan y gestionan el intercambio de información con un operador

¹⁸ K.-Y. K. J. Sang-Min Lee, "A Fuzzy Logic for Autonomous Navigation of Marine Vehicles Satisfying COLREG Guidelines," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 171-181, 2004.

¹⁹ E. A. S. Campbell, "A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres," *Annual Reviews in Control*, vol. 36, pp. 267-283, 2012.

²⁰ V. Bertram, (2008) *Unmanned Surface Vehicles – A Survey*, *Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark.

²¹ R. A. Díaz Meza, *Diseño e Implementación de un Vehículo de Superficie no Tripulado Provisto de un Sistema de Adquisición de Datos en Tiempo Real Para la Inspección de Calidad de Agua y Análisis de Muestras* en Lagos, España, 2019.

humano para tomar decisiones, interpretar la información de los sensores, diagnosticar problemas y colaborar con otros sistemas²².

El tipo de arquitectura que normalmente se emplea para el sistema de guía autónoma, navegación y control es aquel en el que un operador interactúa con el USV por medio de una estación en tierra. La estación en tierra provee información del entorno para el operador por medio de imágenes de video, cartas náuticas digitales y datos de radar. El sistema de guía, navegación y control se interfaza por medio de la introducción de puntos o tareas y sus ubicaciones, a través de la estación en tierra hacia el software de planeación de trayectorias (path planning software), que está a bordo de la embarcación. Adicionalmente la embarcación puede ser operada manualmente mediante control remoto, o en modo de seguimiento de puntos. La información se transmite entre el bote y la estación en tierra mediante un enlace de radio de doble vía.

En los últimos años la popularidad de los vehículos autónomos ha ido en aumento¹, así como la técnica y métodos para el control de navegación y la evasión de obstáculos.

Es esencial para proponer algoritmos de control, conocer el modelo del buque en estudio, para lo cual se pueden utilizar modelos de buques planteados por varios autores entre los que se encuentra el modelo de referencia o Nomoto²³ el cual plantea un modelo de segundo orden, el modelo de Bech y Wagner Smith , el cual añade una característica de no linealidad al modelo de Nomoto de segundo orden y el modelo de Norrbín , el cual es una extensión del modelo de Nomoto de Primer orden²⁴.

Otro punto a tener en cuenta son las reglas COLREGS del año 1972²⁵ (The International Regulations for Preventing Collisions at Sea) son las reglas que coordinan la conducta de una embarcación en riesgo de Colisión o abordaje con otra, sin embargo, son reglas cualitativas y deben poner en uso luego de cuantificar la situación o riesgo, estas reglas definen algunos términos como es la distancia al posible punto de colisión (DCPA) y el tiempo para alcanzar el punto de colisión (TCPA)²⁶.

Para solucionar el problema de evasión de obstáculos en el ámbito de la robótica móvil es posible realizar algoritmos de evasión óptimos con previo conocimiento del

²² J. Colito, (2007) Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned. M.S. thesis: University of Washington.

²³ M. Tomera, "Nonlinear controller design of a ship autopilot," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 271-280, 2010.

²⁴ T. Fossen, M. Paulsen, (1992) Adaptive Feedback Linearization. *1st IEEE Conference on Control Applications*, Dayton, Ohio.

²⁵ G. W. I. A. Y. Wasif Naeem, "COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 669-678, 2012.

²⁶ C. Hwang, "The Integrated Design of Fuzzy Collision-Avoidance and H [infty infinity]-Autopilots on Ships," *THE JOURNAL OF NAVIGATION*, vol. 55, pp. 117-136, 2002.

ambiente de trabajo del robot²⁷, o mediante un enfoque bayesiano, pero está limitado a interiores y áreas no tan extensas²⁸.

En cuanto a los algoritmos de navegación en buques o USV es posible usar técnicas de control PID convencional, pero es más confiable la implementación de algoritmos inspirados en el control adaptativo, como el modelo de referencia y el auto-tuning y la lógica difusa²⁹. La lógica difusa extiende sus aplicaciones también al área de la evasión de obstáculos para evitar colisiones con objetos fijos y móviles; Los sistemas de control difusos se pueden potenciar con algoritmos de control neuro-difusos y la utilización de términos consecuentes no lineales³⁰.

Otros métodos de control de un autopiloto para buque es el sliding model control, o SMC³¹, el cual es un método de control no lineal, para el cual es necesario conocer el modelo matemático del buque analizar²³.

Las técnicas de evasión de obstáculos también incluyen el uso de herramientas probabilísticas³² para la estimación de la velocidad de obstáculos (PVO – Probabilistic Velocity Obstacle), (MPVO – Marine Probabilistic Velocity Obstacle) y perfiladores acústicos de corriente por medio de doppler ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) para la obtención de la altura y dirección de las olas, los cuales se integran con el hidroanálisis de medidas y parámetros de viento estimados para un día específico y complementan el sistema para evasión de obstáculos y colisiones³³.

Entre los otros métodos de control no lineal de trayectoria para navegación de barcos, se encuentra el control por modo deslizante, para el cual es indispensable conocer el modelo matemático del vehículo a controlar, en modelo matemático consta de 6 ecuaciones en diferencia, que describen los seis grados de libertad del vehículo³⁴.

En lo que se refiere a sistemas para el control de navegación y la evasión de obstáculos móviles y fijos; sistemas que están íntimamente relacionados, algunos de los últimos desarrollos es el uso de cámaras a bordo de los vehículos no tripulados con propósitos científicos para recolección de información, vigilancia para uso de la fuerza y seguridad, así como para proveer información visual para detectar y evitar

²⁷ A. S. R. Zaccaria, "Planning and obstacle avoidance in mobile robotics," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 4, pp. 628-638, 2012.

²⁸ D. P. a. A. J. Widodo Budiharto, "A robust obstacle avoidance for service robot using Bayesian approach," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 37-44, 2011.

²⁹ E. A. S. Bhattacharyya, "Fuzzy autopilot for ship maneuvering," *International Shipbuilding Progress*, vol. 58, no. 4, pp. 191-218, 2011.

³⁰ P. J. C. Robert Sutton, "A FUZZY AUTOPILOT DESIGN APPROACH THAT UTILIZES NON-LINEAR CONSEQUENT TERMS," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 65-74, 2001.

³¹ A. S. R. Zaccaria, "Planning and obstacle avoidance in mobile robotics," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 4, pp. 628-638, 2012.

³² A. V. S. Hamid Teimoori, "Equiangular navigation and guidance of a wheeled mobile robot based on range-only measurements," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, pp. 203-215, 2010.

³³ D. Bertin, "U-Ranger - An Unmanned Surface Vehicle for Surface and Underwater Missions," *Italia*, 2009.

³⁴ M. Tomera, "Nonlinear controller design of a ship autopilot," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*, vol. 20, no. 2, pp. 271-280, 2010.

colisiones eminentes para navegación autónoma mediante algoritmos de detección automática de blancos (ATD – Automatic Target Detection). Sin embargo, es posible realizar la evasión de obstáculos fijos a bajo costo con sensores ultrasónicos, y con algoritmos bioinspirados, mediante el método de sistema vectorial de fuerza³⁵. En cuanto a la evasión de obstáculos móviles con sensores ultrasónico, se utilizan leyes como la de orientación y la ley equiangular³⁶, que asumen que la velocidad del USV es constante y por previa identificación de la dinámica del USV basado en su círculo de evolución, lo que ayuda a implementar algoritmos de evasión de obstáculos móviles.

1.3. Aporte investigativo del proyecto.

El aporte principal es el desarrollo de los algoritmos para evasión de obstáculos en vehículos de superficie, que puedan ser implementados con sensores y hardware de bajo costo. Adicionalmente, se aportan técnicas de modelamiento de la dinámica de este tipo de vehículos. Se contribuye al crecimiento del grupo de Investigación de la ENAP y a la ENAP misma, dotando a los vehículos de superficie de características de mejor autonomía y desempeño para las diferentes tareas de misión tácticas de los oficiales navales.

Basado en un prototipo de USV existente, así como en la profundización de conceptos en los campos de la lógica difusa, las redes neuronales y la programación de sistemas embebidos. Se pretende aportar y demostrar la forma de utilizar sensorica de bajo costo en conjunto a algoritmos de control inteligente, y así desarrollar e implementar una adecuada evasión de obstáculos tanto fijos como móviles para el modelo a escala de vehículo de superficie de la Escuela Naval Almirante Padilla.

³⁵ J. S. DAR. Acosta, "algoritmo bioinspirado de evasión de obstáculos," *Tecnura*, vol. 13, no. 25, pp. 38-48, 2009.

³⁶ H. T. AV. Savkin, "Equiangular navigation and guidance of a wheeled mobile robot based on range-only measurements," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 2, pp. 203-215, 2010.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar e implementar un sistema de evasión de obstáculos fijos y móviles para un vehículo de superficie a escala.

1.4.2. Específicos.

- Diseñar una arquitectura de gestión de misiones para el prototipo USV de la ENAP, que integre prototipo USV, control de maniobrabilidad, estrategias de evasión de obstáculos fijos y móviles, estación de tierra y control de misión.

Implementar e integrar los subsistemas hardware y software de la arquitectura de gestión de misiones diseñada para el prototipo USV de la ENAP

- Validar mediante pruebas de campo el sistema de evasión de obstáculos fijos y móviles Implementado en el prototipo USV de la ENAP.

1.5. Propuesta.

La propuesta que se busca, consolidar, con este trabajo, es la implementación de los algoritmos de evasión de obstáculos en un USV, manera optimizada, centrando el poder de procesamiento del sistema embebidos, en dicha tarea, lo cual involucra el uso de técnicas de vectores de interrupciones y uso de acceso directo a memoria, para evitar retrasos no deseados, en este tipo de algoritmos.

2. CARACTERISTICAS Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA A DISEÑAR.

Los requerimientos para poder implementar los algoritmos deseados, se dividen en dos grandes áreas.

2.1. Hardware.

2.1.1. Microcontrolador.

Es el cerebro del USV, debe ser un microcontrolador con capacidad de DSP, además de permitir comunicación directa de dispositivo a memoria y viceversa (DMA), de una velocidad superior a los 50 MIPS, debido a que se van a controlar diferentes tipos de motores, debe contar con una unidad de motor-control, y periféricos para los sensores y comunicaciones, tales como USART, I2C, SPI, USB, preferiblemente remapeables.

2.1.2. Sensores.

Entre los principales sensores con que debe contar el USV están: 1 GPS de Precisión, un Sensor Inercial IMU que incluya Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro, sensor de temperatura y Humedad, Arreglo de sensores de Distancia con rango de detección superior a metros, 1 Cámara, entre otros.

2.1.3. Actuadores.

Entre los Actuadores, se tienen los motores de Propulsión, el motor de Dirección, y el motor de PAN o giro de la cámara.

2.1.4. Comunicación.

Debe contar con una comunicación de datos que garantice una línea de vista superior a 50Km línea de vista, un receptor de Radio control, que permita controlar al USV también de manera manual y dar órdenes puntuales, además de un sistema de transmisión RF de video y por último un driver ESC para el control de los motores Brushless.

2.1.5. Almacenamiento.

El sistema debe poder tener la capacidad de tener un almacenamiento externo, que permita tomar datos, almacenarlos, lo que será útil para la posterior identificación del modelo matemático del mismo.

2.1.6. Alimentación.

Debe contar con un sistema de batería para los motores y otro para la tarjeta de control.

2.1.7. PCB.

El circuito impreso, del sistema, debe ser lo más reducido, y con el grosor y calidad requeridas para trabajar en este tipo de ambiente de alta humedad.

2.2. Software.

2.2.1. Firmware.

Es el programa que final que contendrá el microcontrolador, debe ser optimizado, usar interrupciones y DMA, con el fin de centrar el poder de cálculo del microcontrolador en los algoritmos de evasión de obstáculos fijos y móviles.

2.2.2. Software en el PC.

Se necesita un software que permite, analizar datos, para la posterior identificación de modelo del sistema, y simulación del mismo. De igual forma otro software en el pc con interfaz gráfica< agradable que permita almacenar y monitorear los datos en tiempo real del UAV, que viene actuando como una estación en tierra; la Escuela Naval Almirante Padilla debe contar con licencia del mismo.

2.2.3. Compilador.

Es el software, instalado en el PC donde se desarrollará el código de programación haciendo uso de un lenguaje de alto nivel, preferiblemente C++, la Escuela Naval Almirante Padilla debe contar con licencia del mismo.

3. DISEÑO DEL SISTEMA.

Se presente en la figura 4 el diagrama de bloque general del sistema del vehículo de superficie, sobre el cual se implementará el algoritmo de evasión se obstáculos fijos y móviles.

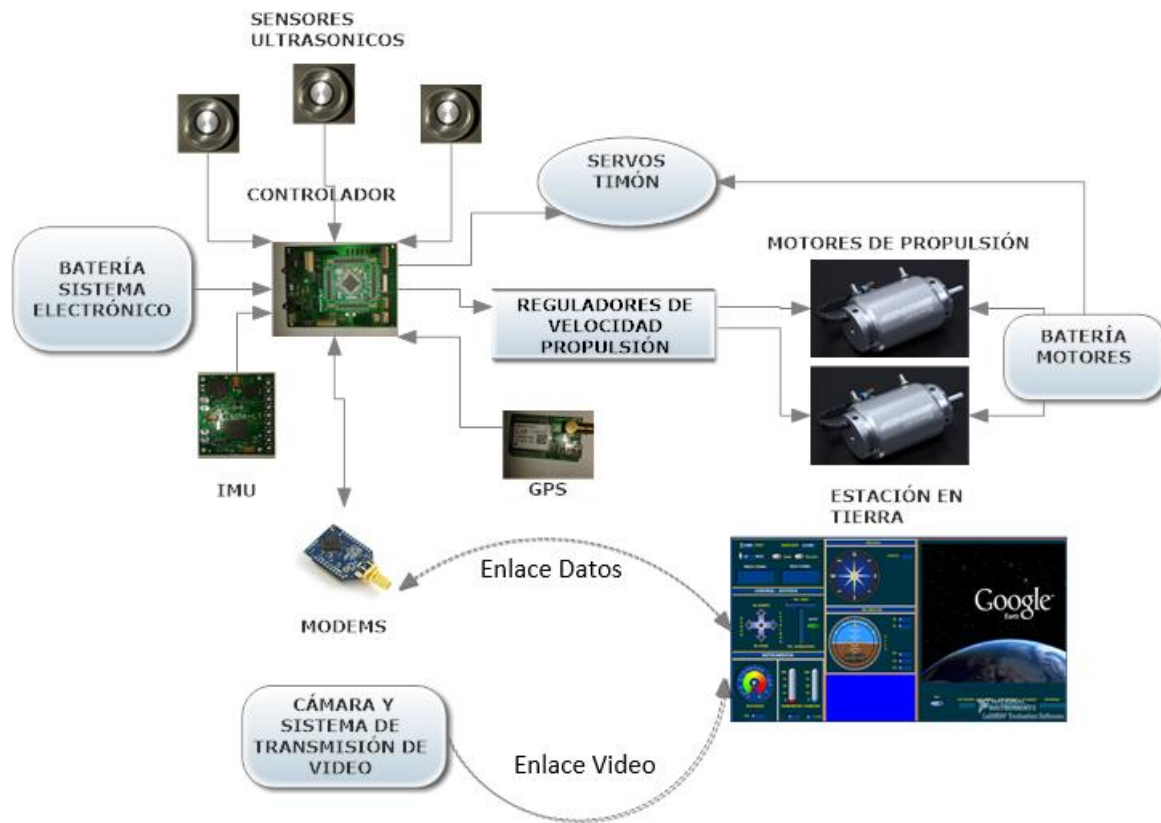


Figura 4. Fuente propia del autor.

Con base al anterior diagrama de bloques, básico, centrado en los componentes de hardware esenciales para la implementación de los algoritmos de evasión de obstáculos fijos y móviles, como son los sensores de distancia y los sensores que intervienen directamente en la navegación y control del USV, se procede a la selección del controlador, sensores y actuadores, para cumplir los objetivos propuestos.

3.1. Selección de los componentes USV.

Esta selección se centra en la selección componentes críticos, necesarios para la navegación y el sistema de evasión de Obstáculos, teniendo en cuenta que ya se contaba, con el casco del buque, motores y controlador de velocidad de los motores, desarrollado en un proyecto de pregrado del 2011 de la ENAP. “*diseño e implementación de un sistema de control de navegación para un USV*”³⁷

3.1.1. Sensores.

3.1.1.1. GPS.

Para la selección del GPS, se tiene como primicia que debe ser un GPS que tenga certificaciones ISO relacionadas al trabajo en ambientes de trabajo pesado, así como su uso para vehículos móviles. La empresa Ublox, posee una serie de GPS con esas características, los u-blox LEA-6 Series³⁸, en la figura 5 se muestra una tabla con varios GPS de la serie 6, los cuales tienen certificación ISO 16750, para el uso de vehículos de carretera.

Model	Type						Supply		Interfaces				Features						
	Standalone GPS	Standalone GLONASS	Standalone Galileo	QZSS	Timing & Raw Data	Dead Reckoning	1.75 V – 2.0 V	2.7 V – 3.6 V	UART	USB	SPI	DDC (iPC compliant)	Programmable (Flash) FW update	Oscillator	RTC crystal	Antenna supply and supervisor	Configuration pins	Timepulse	External interrupt / Wakeup
LEA-6N	•	•	R	•			•		•	•	•		•	T	O	•		1	•
LEA-6H	•	R	R				•		•	•	•		•	T	O	•		1	•
LEA-6S	•						•		•	•	•			T	O	•	1	1	•
LEA-6A	•						•		•	•	•			C	O	•	1	1	•

R = HW ready, firmware upgrade required.
O = Onboard RTC crystal for faster warm and hot starts.

C = Crystal / T = TCXO

Figura 5. Tabla de GPS serie 6 de ublox.

³⁷ W. A. C. CELIS, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NAVEGACION PARA UN USV," Cartagena, 2011.

³⁸ <https://download.mikroe.com/documents/datasheets/lea-6-product-summary-gps-g6-hv-09002.pdf>

El GPS seleccionado es el LEA-6s, el cual posee múltiples puertos de comunicación un protocolo propio, con el cual se puede configurar solo los parámetros deseados, y minimizar el ancho de banda y tiempo de procesamiento por parte del microcontrolador.

El Modulo GPS se importó de la empresa Mikroelectronika, bajo la referencia de GPS Click³⁹, por un valor de \$50 dólares.

3.1.1.2. IMU.

El sensor inercial debe tener, magnetómetro, giroscopio y acelerómetro, mínimamente, y como el objetivo del proyecto, es liberar de procesamiento al micro para que centre todo su poder en el algoritmo de evación de obstáculos, el IMU debe realizar los cálculos de los ángulos de Euler, cuaterniones, y utilizar filtros de Karman extendido para ello, de esta forma ya entregará al microcontrolador la información del comportamiento del buque en los 3 ejes de forma pre procesada. En la figura 6 se muestra una tabla de los posibles GPS en consideración.

Product Name	Sensors				Estimation				Other
	Gyros (3x)	Accels (3x)	Mag (3x)	Altitude	Roll	Pitch	Yaw	Quaternion	Enclosure
Pololu MiniIMU-9 v5	✓	✓	✓						
Pololu AltIMU-10 v5	✓	✓	✓	✓					
Redshift Labs UM7-LT Orientation Sensor	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Redshift Labs UM7 Orientation Sensor	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

Figura 6. Comparación IMU

El IMU seleccionado es el UM7⁴⁰ con carcasa lo que da más robustez, por un valor de 180 dólares, El cual implementa el filtro de Karman extendido y el cálculo de los ángulos de Euler, y posee una comunicación serial, que puede ser adquirida mediante interrupción por el microcontrolador.

3.1.1.3. Sensores de distancia.

Este es el corazón del sistema de evación de obstáculos, se optó por usar sensores ultrasónico robusto y de un alcance de 10 metros, en la tabla 1 se hace una comparativa de varios sensores ultrasónico⁴¹, que se consideraron para este proyecto.

³⁹ <https://www.mikroe.com/gps-click>

⁴⁰ <https://www.pololu.com/product/2764>

⁴¹ https://www.maxbotix.com/documents/XL-MaxSonar-WR_Datasheet.pdf

Características	MB1040	MB7092	MB7076
			
Distancia	10cm a 600cm	1cm a 765cm	1cm a 1000cm
Precio en dólares	\$ 27	\$105	\$114
Tipo salida	Análoga, PWM	Análoga, PWM	Análoga, PWM
Alimentación	3.3v -5V	3.3v -5V	3.3v -5V
Robusto	No	Si	Si

Tabla 1. Selección sensores Ultrasónicos. Fuente propia del autor.

El sensor ultrasónico seleccionado es el MB7076 por su robustez y gran alcance, para el arreglo de sensores ultrasónicos, basado en el lóbulo de emisión del sensor seleccionado, se optó por seleccionar tres sensores en un arreglo de 90 grados entre ellos. La figura 7 muestra la forma del lóbulo de emisión del sensor, donde cada cuadrícula representa 30cm, con los cual es suficiente un sensor por cada cara del USV, omitiendo la trasera, ya que entrega un máximo de 60cm de cobertura por cara, lo que es más que suficiente para por el tamaño del USV.

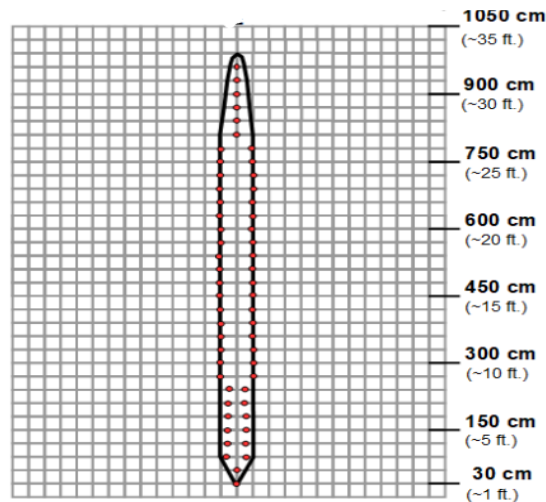


Figura 7. Lóbulo de emisión del sensor MB7076⁴²

⁴² https://www.maxbotix.com/documents/XL-MaxSonar-WR_Datasheet.pdf

En la figura 8 se muestra la manera como se ubicaron los 3 sensores utilizados.



Figura 8. Arreglo de sensores ultrasónicos. Fuente propia del autor.

3.1.2. Microcontrolador.

Si los sensores de distancia son el corazón del sistema de evasión de obstáculos fijos y móviles, el microcontrolador viene siendo el cerebro del mismo, debe ser un microcontrolador con capacidades de DSP, opciones de múltiples interrupciones con vector independiente, y varios canales DMA; debido que el GPS, el IMU y el módem de RF tienen comunicación UART debe tener más de 3 puertos USART. En la tabla 2 se hace una comparativa de 3 micros que se consideraron.

El microcontrolador seleccionado es el DSPIC33EP512MU810, por sus características de DSP, 15 canales DMA, y alta memoria de programa para implementar los algoritmos.

Características	Atmega328P	DSPIC 33EP512MU810	STM32F103C8T6
# bits	8	16	32
Alimentación	5v	3.3v	3.3v
pins	28	100	64
Puertos USART	1	4	3
Flash	32Kb	512Kb	64kb
RAM	2Kb	52Kb	20kb
Velocidad	20Mhz	70Mhz	72Mhz
DMA	No	15 canales	7 canales
Motor Control	No	Si	Si
Remapeable	No	Altamente	Medianamente

Tabla 2. Comparación entre microcontroladores. Fuente propia del autor.

En el diseño final para garantizar una redundancia, se usaron 2 DSPIC33EP512MU810, los cuales monitorean los sensores, y entre ellos se comunican para encontrar inconsistencias, y cualquiera de ellos mediante un multiplexor del cual se hablará más adelante pueden tomar el control de los motores. Además de la comunicación, hay un pin de testigo, el cual crea una señal cuadrada dentro de la función principal (main) de cada microcontrolador, lo que le garantiza al otro, su correcta ejecución del código y coherencia d ellos datos obtenidos. En la figura 9 se muestra un diagrama de bloque del sistema mencionado.

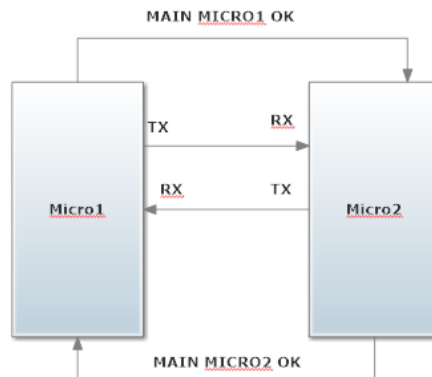


Figura 9. Sistema de redundancia. Fuente propia del autor.

3.1.3. Comunicaciones.

Aunque el sistema de comunicación de datos, una vez el buque está en forma autónoma no influye directamente en el sistema de evasión de obstáculos si es importante recalcar que se utilizó un módem Xtend 9000MMZ de la empresa Digi el cual entrega 64KM en línea de vista.

En lo relacionado con la transmisión de video se utilizó un trasmisor de 1W a 5GHZ. Y el Receptor de Radiocontrol es un futaba de 2.4GHZ.

El punto clave en las comunicaciones y lo que se tuvo en cuenta, es que las frecuencias de operación de cada sistema no estuviesen en la misma frecuencia, o cerca, ni tampoco de la frecuencia del receptor de GPS que es aproximadamente 1.5Ghz, de esta forma se evita interferencia y se mejora la compatibilidad electromagnética del sistema.

3.1.4. Alimentación.

El USV cuenta con 2 baterías lipo, una de 14.8V y 8Ah para los motores de propulsión y otra de 3 celdas 11.1v y 2Ah para la alimentación de la parte de control, la cual regula con fuentes conmutada a 5 y 3.3v, para los sensores y el microcontrolador.

3.1.5. Otros dispositivos.

El hardware diseñado cuenta con otros dispersivos de soporte del sistema como es un sensor de temperatura por SPI, que es el DS1722, una memoria SPI de 4Mb, que es la AT25F4096 y por último un multiplexor el 74157, el cual permite a cualquiera d ellos dos microcontroladores tomar el control de los motores del USV.

3.2. Software.

La selección de los softwares utilizados para la realización de este proyecto, se centra en que deben ser software con los cuales la ENAP cuenta con licencia vigente.

3.2.1. Compilador.

Para el microcontrolador seleccionado, existen 3 compiladores líderes, que son CCS, MPLAB xc32 y Mikroc Pro For DSPIC, de los cuales la ENAP cuenta con licencia de XC32 y Mikroc, por los cual estos fueron los seleccionados, el firmware se desarrolló en ambos, con excelentes resultados, pero en este trabajo se mostrará los códigos sólo en Mikroc Pro For DSPIC que fue con el que se hicieron las pruebas finales.

3.2.2. Software del PC.

En lo relacionado a software de PC utilizado, está Matlab, que se usó para la obtención del modelo matemático, y la simulación del algoritmo de evasión de objetos fijos. El otro software utilizado es Labview, el cual se utilizó, para la estación en tierra el USV. Cabe destacar que la ENAP posee licencia para ambos.

En Labview se implementó la estación en tierra del USV. En la figura 10 se muestra la interfaz gráfica de la misma.



Figura 10. Estación en tierra. Fuente propia del autor.

Y por último para el diseño del esquemático y del circuito impreso del sistema se utilizó el software Proteus.

4. DISEÑO DEL SISTEMA.

4.1. Hardware.

En cuanto a hardware se refiere, se realizó el diseño esquemático y del PCB del sistema utilizando proteus, la figura 11 muestra el diseño esquemático del sistema.

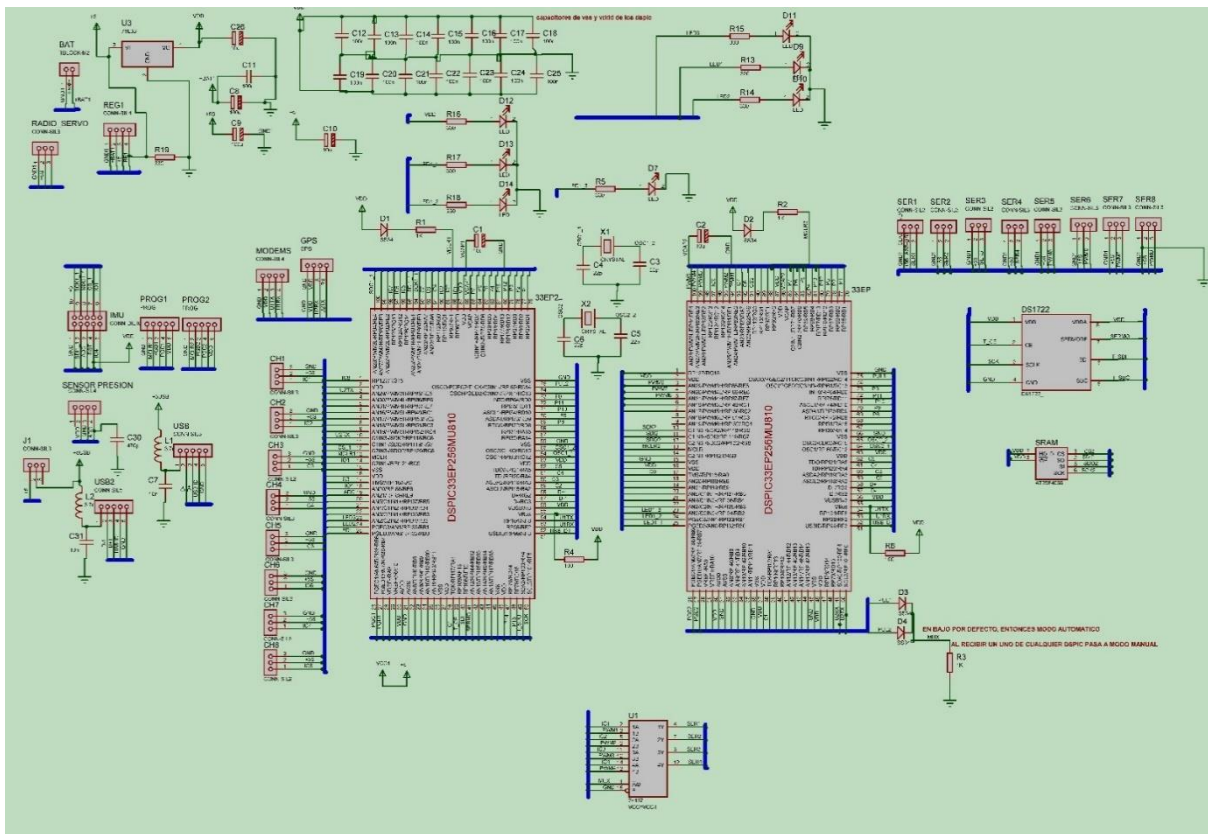


Figura 11. Diagrama esquemático. Fuente propia del autor.

Para el diseño del PCB, se optó por hacerla 4 capas para, reducir tu tamaño, y mejorar compatibilidad electromagnética, del sistema. La figura 12 muestra la configuración y color de las capas utilizadas.

Diseño de un Sistema de Evasión de Obstáculos Fijos y Móviles para un Vehículo de Superficie.

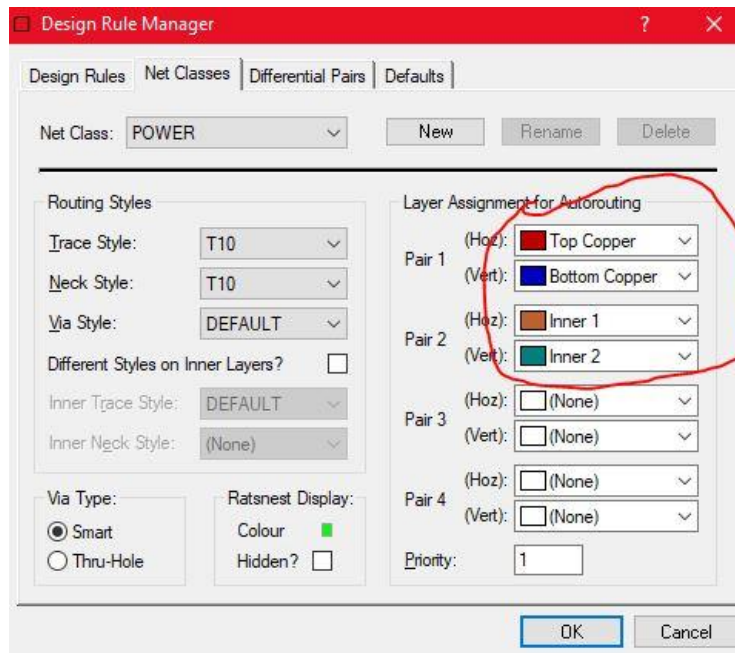


Figura 12. Configuración de las cuatro capas. Fuente propia del autor.

Y en la figura 13 se muestra el diseño del PCB.

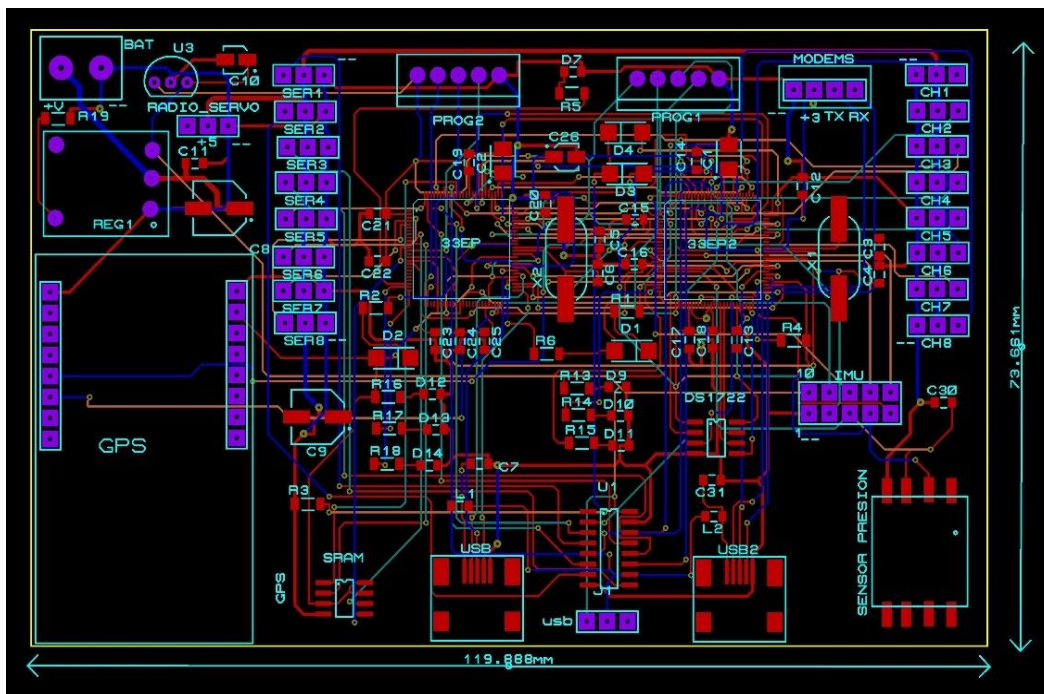


Figura 13. Diseño del PCB. Fuente propia del autor.

Diseño de un Sistema de Evasión de Obstáculos Fijos y Móviles para un Vehículo de Superficie.

En la figura 14 se muestra una foto real de la PCB implementada.



Figura 14. PCB implementada. Fuente propia del autor.

Y para mayor ilustración en la figura 15 se muestra la tarjeta PCB con sus conexiones.

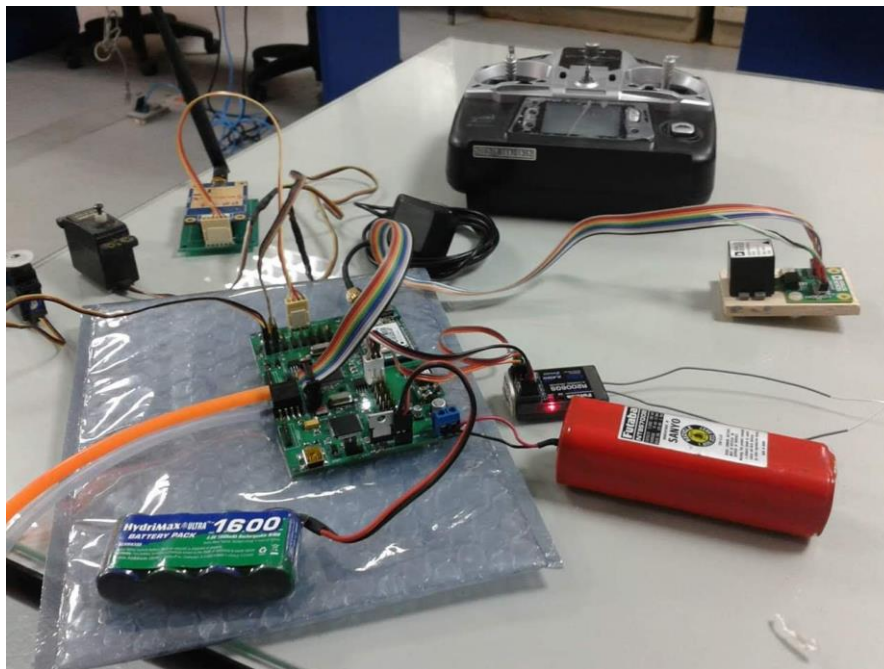


Figura 15. Tarjeta PCB con conexiones. Fuente propia del autor.

Una vez descrito la selección, diseño e implementación del hardware del USV, se muestra en la figura 16 el aspecto final del prototipo de USV, con características de evasión de obstáculos fijos y móviles.



Figura 16. USV ENAP. Fuente propia del autor.

4.2. Firmware.

4.2.1. Interrupciones de recepción en el puerto USART.

En total se utilizan los 4 puestos de comunicación USART del DSPIC, de esta manera:

- 1 USART LECTURA GPS.
- 1 USART lectura y configuración del IMU.
- 1 USART para comunicación full duplex con la estación en tierra.
- 1 USART para comunicación full duplex entre los dos Microcontroladores.

Existe una versión del firmware para otra IMU por SPI, que permite usar solo 3 USART.

4.2.2. Canales DMA.

Es indispensable utilizar el acceso directo a memoria, debido a que, por ejemplo, si para la transmisión serial a la estación en tierra, así se realice a una velocidad de 115.200 baudios, cada vez que se transmita algo, añade retardos indeseados que afectan de una forma directa el algoritmo de evasión de obstáculos, por los que en este caso, se crea un buffer de DMA, el cual se encarga de transmitirse, automáticamente, cada cierto tiempo, determinado en 100ms pero con el uso de interrupciones de un timer, para sí no afectar con retardo el programa principal.

4.2.3. Módulo INPUT CAPTURE,

El USV cuenta con varias señales de tipo PWM que debe procesar, como son las de los 6 canales del receptor de radiocontrol (solo se usan 4), y las 3 señales de la señal de distancia de los sensores ultrasónicos, que, aunque hacen parte del sistema de evasión de obstáculos, para evitar retardos, se deben obtener por una interrupción de input capture, de esta forma el sistema usa 7 de los 16 canales de input capture que tiene el DSPIC.

4.2.4. Salida PWM.

Se usan 4 señales de salidas PWM, utilizando el módulo de motor control del DSPIC, lo que permite un mejor control de los motores, estas señales son 2 para los motores de propulsión, una para el servomotor de dirección y otra para el servomotor de giro de la cámara de video.

A continuación, en la figura 17 se muestra un diagrama de flujo del sistema. Y en el Anexo A se muestra el código del firmware principal y alguna de las librerías utilizadas, cabe destacar que por ser este un proyecto de uso militar hay una carta de confidencialidad firmada, que limita un poco este aspecto.

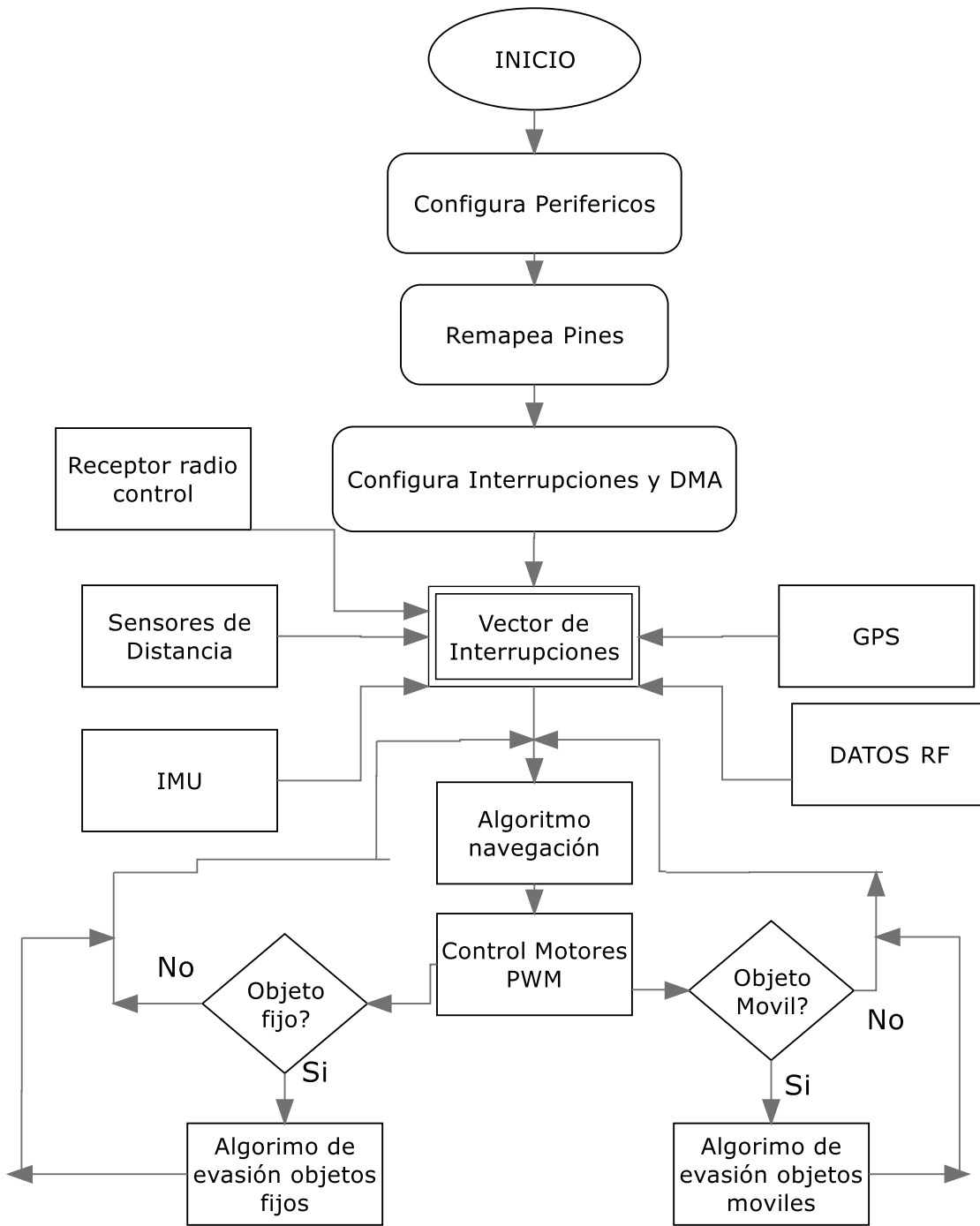


Figura 17. Firmware. Fuente propia del autor.

5. CARTERIZACIÓN DEL VEHÍCULO DE SUPERFICIE.

El vehículo de superficie empleado tiene una eslora (longitud de la embarcación desde la popa hasta la proa) de 0.78 metros, una manga máxima (ancho del buque) de 0.19 metros, un peso de 9.2 kilogramos y una velocidad máxima de 0.7 metros por segundo.

Item	Description
Length	0.78m
Width	0.19m
Mass	9.2 Kg
Propelling source	DC motor
Endurance	1.2 hours
Maximum speed	0.7 m/s

Tabla 3. Características del USV. Fuente propia del autor

5.1. Modelo matemático de la dinámica del buque.

La OMI (Organización Marítima Internacional) mediante su Resolución A.757(18), la cual establece normas provisionales sobre maniobrabilidad de los buques, recomienda el uso de modelos matemáticos simplificados de modelos de barcos, siendo los modelos de Nomoto, de primer y segundo orden, unos de los mas empleados para describir, de manera simplificada, la dinámica del barco [1], [2], y para el análisis y diseño de pilotos automáticos de barcos [3], [4].

La dinámica de un barco se puede describir mediante seis ecuaciones diferenciales no lineales basada en las ecuaciones de momentos y fuerzas que actúan sobre un barco en tres dimensiones. Para obtener un modelo simplificado se debe inicialmente omitir acoplamientos entre los movimientos oscilantes de la embarcación alrededor de los ejes. Posteriormente se procede a una linealización alrededor de un punto de trabajo seleccionado y, después de la eliminación de la velocidad de balanceo, se obtiene una ecuación diferencial lineal simplificada a partir de la cual se deriva la ecuación del modelo de Nomoto de segundo orden, el cual contiene tres constantes de tiempo T_1 , T_2 , T_3 y una ganancia k , que dependen de las derivadas de las fuerzas y momentos hidrodinámicos con respecto a la velocidad de oscilación y oleaje y la velocidad de guiñada [5]. Algunos autores emplean versiones aún más simplificadas, como el modelo de Nomoto de primer orden, aunque esta último es empleado en los casos en que el rumbo y la velocidad del barco se mantienen constante [6].

Los modelos difusos representan una técnica muy empleada recientemente para el modelamiento de procesos complejos. Sistemas complejos no lineales pueden ser aproximados mediante el modelo difuso llamado Takagi-Sugeno (T-S), en el que la dinámica del sistema puede ser capturada mediante la combinación de conjuntos difusos de modelos dinámicos locales lineales [7], [8].

Inicialmente se procedió a obtener un modelo de Nomoto de segundo orden, por ser uno de los modelos más empleados para el diseño de pilotos automáticos de embarcaciones. Para el proceso de identificación del modelo se emplearon de pruebas estándares definidas por la OMI: la prueba de círculo evolutivo, que consiste en mantener el barco en un rumbo fijo, luego mover el timón un determinado ángulo y monitorear la dinámica del rumbo del buque ante el cambio en el timón, y la prueba de zig-zag, también conocida como maniobra de Kempf, la cual consiste en mantener el buque a una velocidad constante, en línea recta, durante un determinado tiempo y, después de alcanzar la condición de equilibrio, se acciona el timón colocándolo a θ° y se mantiene constante hasta que el buque cambie el rumbo a θ° . Entonces el ángulo del timón es cambiado a $-\theta^\circ$, y así sucesivamente. Debido a las restricciones para la utilización del vehículo, los experimentos de identificación y validación del modelo emplearon los datos de la prueba del círculo evolutivo, ya que existían suficientes pruebas realizadas con este test.

El vehículo de superficie empleado tiene una eslora (longitud de la embarcación desde la popa hasta la proa) de 2.46 metros, una manga máxima (ancho del buque) de 0.896 metros, un peso de 117 kilogramos y una velocidad máxima de 9 nudos. El calado del buque (distancia vertical de la línea de flotación y la línea base del buque) es de aproximadamente 0.15 metros.

Inicialmente se procedió a obtener un modelo de Nomoto de segundo orden, por ser uno de los modelos más empleados para el diseño de pilotos automáticos de embarcaciones. Para el proceso de identificación del modelo se emplearon de pruebas estándares definidas por la OMI: la prueba de círculo evolutivo, que consiste en mantener el barco en un rumbo fijo, luego mover el timón un determinado ángulo y monitorear la dinámica del rumbo del buque ante el cambio en el timón, y la prueba de zig-zag, también conocida como maniobra de Kempf, la cual consiste en mantener el buque a una velocidad constante, en línea recta, durante un determinado tiempo y, después de alcanzar la condición de equilibrio, se acciona el timón colocándolo a θ° y se mantiene constante hasta que el buque cambie el rumbo a θ° . Entonces el ángulo del timón es cambiado a $-\theta^\circ$, y así sucesivamente. Debido a las restricciones para la utilización del vehículo, los experimentos de identificación y validación del modelo emplearon los datos de la prueba del círculo evolutivo, ya que existían suficientes pruebas realizadas con este test.

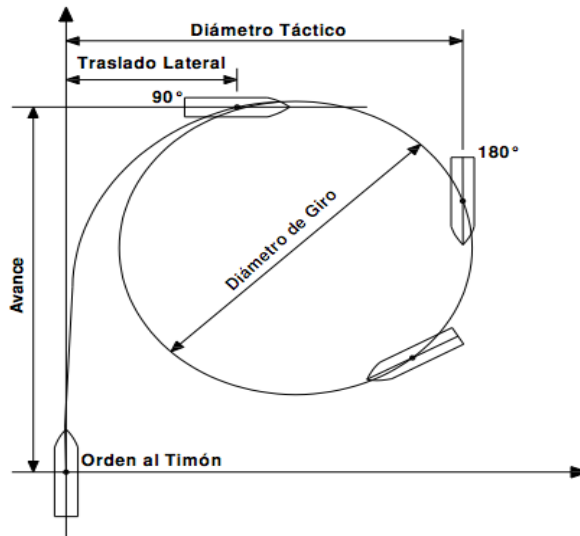


Figura 18. Prueba de círculo evolutivo

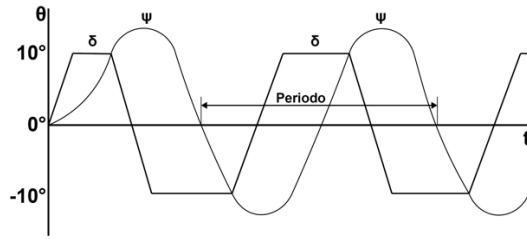


Figura 19. Maniobra de zig-zag 10°/-10°

El modelo de Nomoto de segundo orden está dado por la expresión:

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (1)$$

$$= \frac{\frac{KT_3}{T_1T_2} \left(s + \frac{1}{T_3}\right)}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right) \left(s + \frac{1}{T_2}\right)}$$

donde Ψ representa el ángulo de guiñada o rumbo y δ representa el ángulo de timón. Descomponiendo en fracciones parciales y resolviendo, tenemos que \square

\square

$$\psi(t) = \frac{K(T_1 - T_3)}{T_1(T_1 - T_2)} * e^{-\frac{1}{T_1}t} + \frac{K(T_2 - T_3)}{T_2(T_2 - T_1)} * e^{-\frac{1}{T_2}t} \quad (2)$$

En el dominio de Z tenemos

$$G(z) = \frac{A_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1}\right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_1}T} z^{-1}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1}\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{T_1}T} z^{-1}\right)} \quad (3)$$

$$G(z) = \frac{A_1 + A_2 - \left(\left(A_1 * e^{-\frac{1}{T_2}T} z^{-1} \right) + \left(A_2 * e^{-\frac{1}{T_1}T} \right) \right) z^{-1}}{1 - \left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T} \right) z^{-1} + e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)T} z^{-2}} \quad (4)$$

Donde T es el tiempo de muestreo, y

$$A_1 = \frac{K(T_1 - T_3)}{T_1(T_1 - T_2)}; \quad A_2 = \frac{K(T_2 - T_3)}{T_2(T_2 - T_1)}$$

Haciendo analogía con un modelo discreto de segundo orden expresado por la siguiente ecuación:

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (5)$$

Tenemos que:

$$b_0 = A_1 + A_2$$

$$b_1 = - \left(A_1 * e^{-\frac{1}{T_2}T} + A_2 * e^{-\frac{1}{T_1}T} \right)$$

$$a_1 = -\left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T}\right)$$

$$a_2 = e^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)T}$$

A partir de los cuales se pueden obtener los coeficientes del modelo de Nomoto de segundo orden, K , T_1 , T_2 y T_3 , así:

$$T_2 = \frac{T}{-\frac{T}{T_1} - \ln(a_2)} \quad (6)$$

Si hacemos

$$a_1 * e^{-\frac{1}{T_1}T} = -\left(e^{-\frac{1}{T_1}T} + e^{-\frac{1}{T_2}T}\right) * e^{-\frac{1}{T_1}T} \quad (7)$$

Tendremos que

$$a_2 * e^{\frac{2T}{T_1}} + a_1 * e^{\frac{T}{T_1}} + 1 = 0 \quad (8)$$

y

$$T_1 = \frac{T}{\ln(x_{1,2})} \quad (9)$$

donde

$$x_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4(a_2)(1)}}{2 * a_2} \quad (10)$$

El coeficiente K se calcula a partir de la ganancia del modelo en tiempo discreto ($z = 1$), así:

$$K = \frac{b_0 + b_1}{1 + a_1 + a_2} \quad (11)$$

Y el coeficiente T_3 mediante

$$T_3 = \frac{b_0 T_1 T_2}{K} \quad (12)$$

Para obtener el modelo se realizaron varias pruebas del UAV, en la piscina de la ENAP. Al prototipo se le realizaron las pruebas de círculo de evolución y zig-zag, se realizaron pruebas a ángulos de timón de $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$ y $\pm 20^\circ$ tres pruebas para cada ángulo y a una velocidad constante. Estas pruebas se almacenaron en una memoria SD para su posterior análisis en Labview y Matlab.

A continuación, se ilustra la gráfica de alguna de las pruebas realizadas. En azul se muestra la grafica de timón y en rojo la de rumbo.

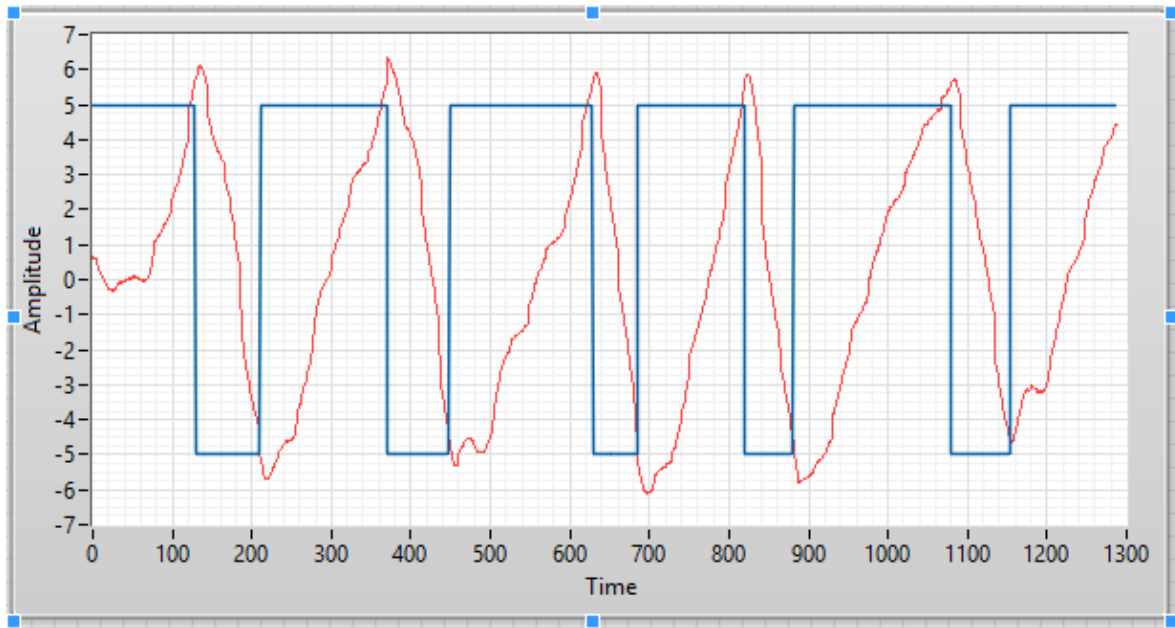


Figura 20. Prueba Zig-Zag $\pm 5^\circ$. Fuente propia del autor.

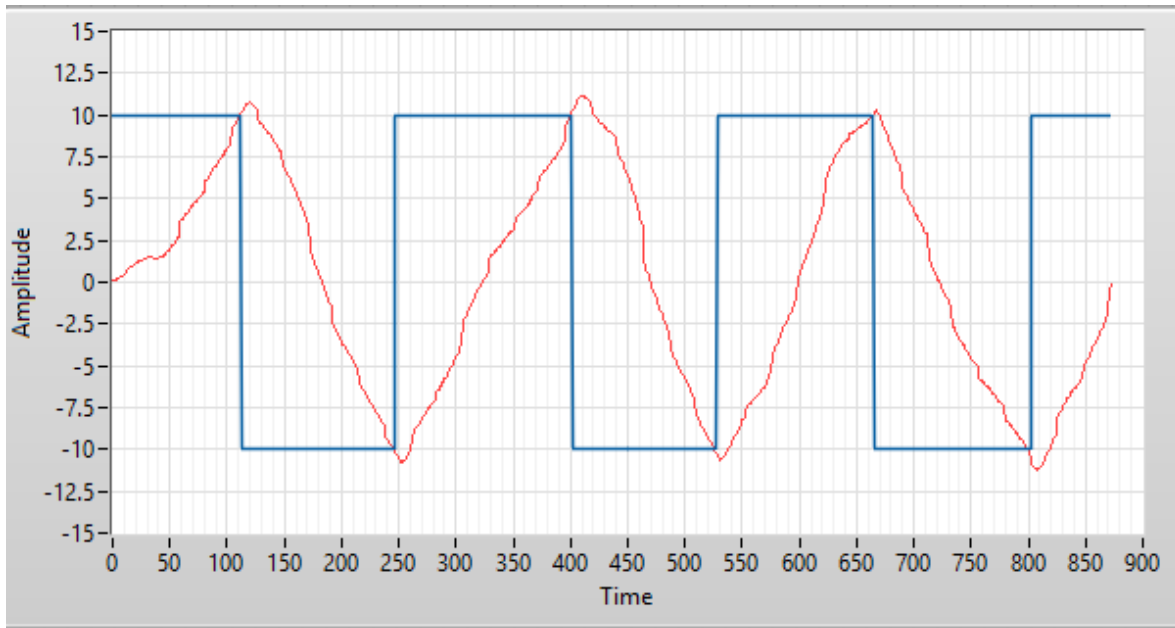


Figura 21. Prueba Zig-Zag $\pm 10^\circ$. Fuente propia del autor.

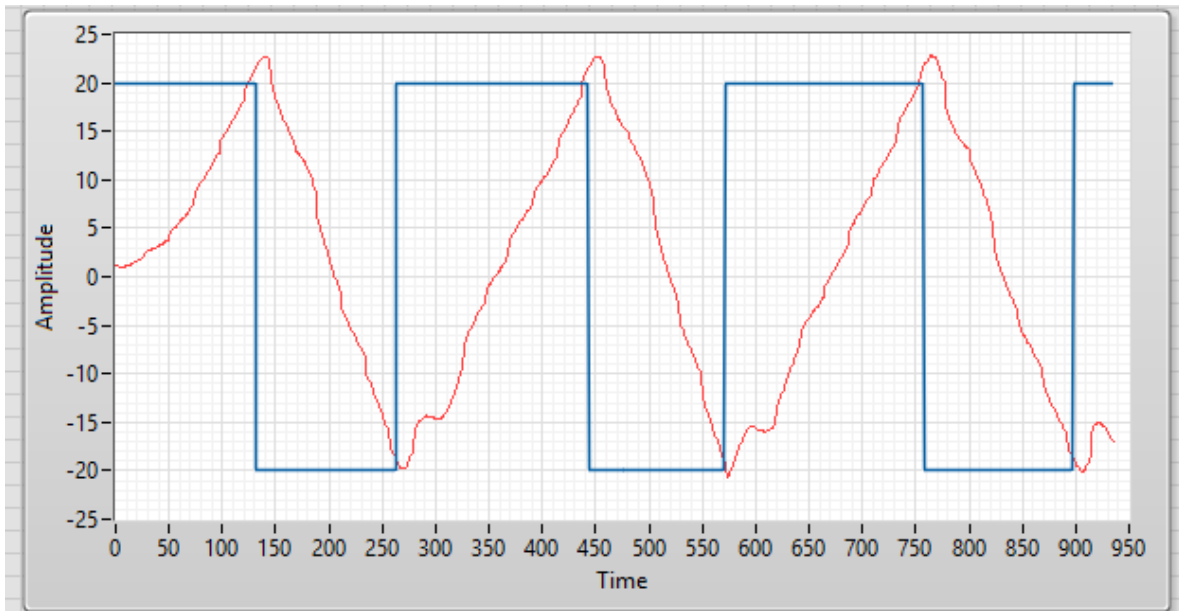


Figura 22. Prueba Zig-Zag $\pm 20^\circ$. Fuente propia del autor.

En el Anexo B se muestra el código en Matlab utilizado para realizar las gráficas de zig-zag y el círculo evolutivo.

En la Figura 23 se muestra el USV en la piscina haciendo las pruebas.



Figura 23. Pruebas en la piscina. Fuente propia del autor.

Con los resultados de las pruebas de zig-zag se procedió a la identificación de los coeficientes del modelo discreto de segundo orden, b_0 , b_1 , a_1 , a_2 , empeando el método de mínimos cuadrados, a partir de los cuales se obtuvieron los coeficientes del modelo de Nomoto K , T_1 , T_2 y T_3 . El resultado obtenido, en el dominio de Laplace, fue:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{-1.55 * (s - 4.961)}{s^2 + 71.69 s} = \frac{7.69 * (-0.201s + 1)}{s^2 + 71.69 s}$$

Donde $K = 7.69$, $T_1 = 0.014$, $T_2 = \alpha$ y $T_3 = -0.201$. El error cuadrático medio normalizado fue de 0.0111. Con los mismos datos se obtuvo también el modelo de Nomoto de primer orden, expresado como sigue:

$$G(s) = \frac{s\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{0.432}{0.03719s + 1}$$

Donde $K = 0.432$ y $T = 0.03719$. El error cuadrático medio normalizado fue de 0.0198.

Posteriormente se procedió a obtener un modelo difuso con consecuentes tipo singleton y particiones triangulares con solapamiento en 0,5 y sus valores modales situados, respectivamente, en el mínimo y el máximo del universo del discurso, cumpliendo las características de un partición difusa fuerte (SFP: Strong Fuzzy Partition) que satisface las siguientes restricciones semánticas: distinguibilidad; superposición en 0.5; cobertura; normalidad; convexidad y el número de conjuntos difusos no es superior a 9. Para cada función de pertenencia triangular, definida por cada variable de entrada, se genera un consecuente tipo singleton, los cuales se estiman a partir de los datos del experimento y utilizando técnicas recursivas de mínimos cuadrados. Se genera una regla por cada consecuente singleton, así:

$$IF u_i \text{ is } A_i^j \text{ THEN } y_{ij} \text{ IS } \theta_{ij} \quad (13)$$

Donde A_i^j representa el j-ésimo valor lingüístico de la variable lingüística u_i definida sobre el universo del discurso U_i , mientras que θ_{ij} es el singleton asociado al valor lingüístico A_i^j .

La salida del sistema difuso está dada por

$$Y = W\theta_{ij} \quad (14)$$

Donde W está definido por el siguiente vector

$$W = [u_{A_1^1}(x_1^k) u_{A_1^2}(x_1^k) \dots u_{A_1^j}(x_1^k) \dots u_{A_n^j}(x_n^k)] \quad (15)$$

Donde n representa the n-ésima variable de entrada y j representa el número de la función de pertenencia por cada variable de entrada.

El modelo difuso obtenido utiliza tres variables de entrada: los valores de las salidas pasadas $y(k - 1)$, $y(k - 2)$ y la entrada actual $u(k)$ para predecir la salida $y(k)$. Para las variables $y(k - 1)$, $y(k - 2)$, se definen dos conjuntos difusos triangulares en el rango -360° a $+360^\circ$. Para la variable $u(k)$ se definen también dos conjuntos triangulares en el rango -25° a 25° , correspondiente al margen de operación del ángulo de timón empleado en las pruebas. Las funciones de pertenencia, para cada variable, se presentan en la Fig. 24a – Fig. 24c

Diseño de un Sistema de Evasión de Obstáculos Fijos y Móviles para un Vehículo de Superficie.

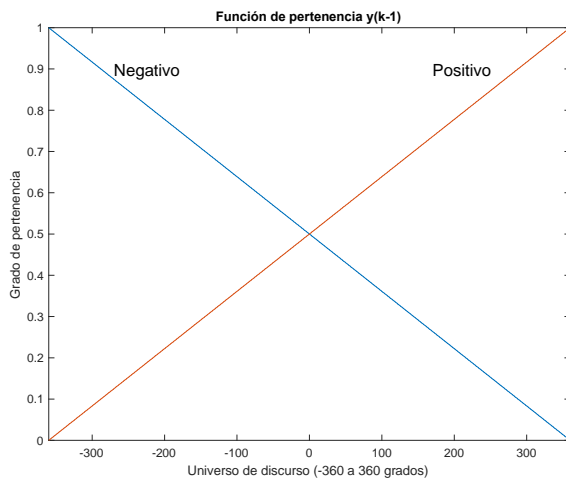


Figura 24a.

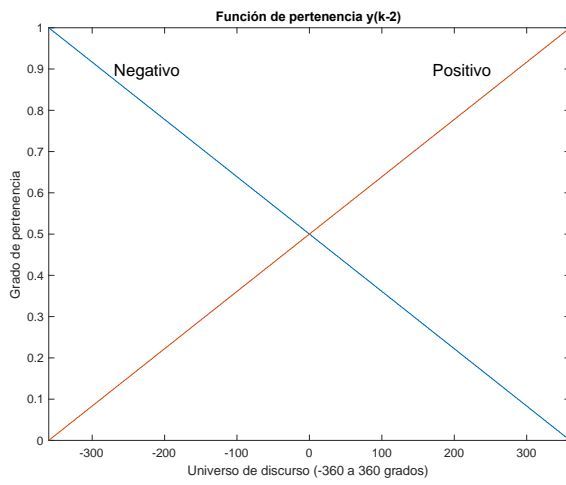


Figura 24b.

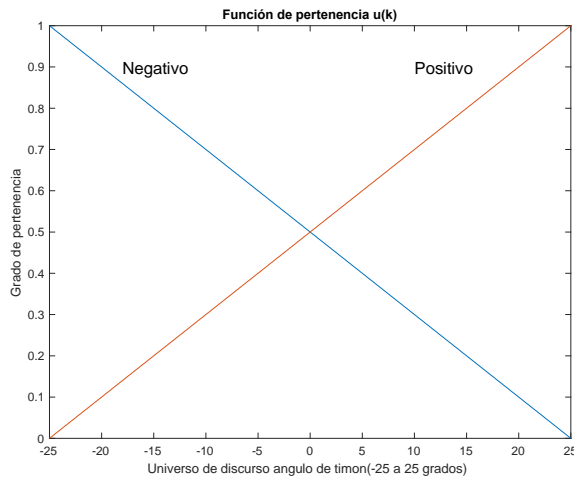


Figura 24c.

Fig24a - Fig24c. Particiones difusas de las variables de entrada: (a) $y(k-1)$; (b) $y(k-2)$; (c) $u(k)$. Fuente propia del autor.

Para el modelo obtenido se tiene

$$W = [u_1(y(k-1)) \ u_2(y(k-1)) \ u_1(y(k-2)) \ u_2(y(k-2)) \ u_1(x(k)) \ u_2(x(k))]$$

y

$$\theta = [\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4 \ \delta_5 \ \delta_6]^T$$

Empleando el método de mínimos cuadrados recursivos se obtuvo el siguiente vector de consecuentes:

$$\theta = \begin{bmatrix} -721.867 \\ 710.537 \\ -720.464 \\ 709.135 \\ -49.267 \\ 37.937 \end{bmatrix}$$

La base de reglas del modelo difuso puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &IF u(y(k-1)) \text{ is } Negativo \text{ THEN } \theta = -721.867 \\ &IF u(y(k-1)) \text{ is } Positivo \text{ THEN } \theta = 710.537 \\ &F u(y(k-1)) \text{ is } Negativo \text{ THEN } \theta = -720.464 \\ &IF u(y(k-1)) \text{ is } Positivo \text{ THEN } \theta = 709.135 \\ &IF u(x(k)) \text{ is } Negativo \text{ THEN } \theta = -49.267 \\ &IF u(x(k)) \text{ is } Positivo \text{ THEN } \theta = 39.937 \end{aligned}$$

Cuando el modelo difuso recibe los datos de entrada, la base de reglas es evaluada empleando la ecuación (14).

El error cuadrático medio normalizado obtenido fue de 0.0048 en el proceso de identificación y menor a 0.0073 en todos los experimentos de validación.

5.2. Control de navegación del vehículo de superficie.

Para controlar el ángulo de rumbo del vehículo mediante el ángulo de timón del mismo, se utilizaron los modelos anteriormente mencionados para diseñar el controlador, realizando pruebas con controladores PID y difusos. Para determinar los parámetros del controlador PID se utilizó el software Matlab y el modelo de Nomoto. A continuación, se expone el procedimiento para determinar el controlador inverso difuso.

Se incluyó una señal modelo de referencia Y_r para proponer un cambio suave del ángulo de rumbo, por lo cual

$$Y_r = W_1\theta_1 + W_2\theta_2 + W_3\theta_3 \quad (16)$$

donde

$$\begin{aligned} W_1 &= [u_1(y(k-1)) \ u_2(y(k-1))]; \ \theta_1 = [\delta_1 \ \delta_2]^T \\ W_2 &= [u_1(y(k-2)) \ u_2(y(k-2))]; \ \theta_2 = [\delta_3 \ \delta_4]^T \end{aligned}$$

$$W_3 = [u_1(x(k)) \ u_2(x(k))]; \ \theta_3 = [\delta_5 \ \delta_6]^T$$

Los vectores $u_1(y(k-1))$, $u_2(y(k-1))$, $u_1(y(k-2))$, $u_2(y(k-2))$, $u_1(x(k))$ y $u_2(x(k))$ representan las funciones de pertenencia de cada variable: $y(k-1)$, $y(k-2)$ y $u(k)$ respectivamente. Los primeros cuatro vectores son conocidos, así como la señal de referencia Y_r . El objetivo es encontrar la señal de control que genera el cambio deseado en el timón con la forma de Y_r , para lo cual emplearemos la técnica de control inverso difuso, así:

$$W_1\theta_1 = Y_r - W_2\theta_2 - W_3\theta_3 \quad (17)$$

Procediendo a calcular

$$u_1(x(k)) = \frac{\left(Y_r - [u_1(y(k-1)) \ u_2(y(k-1)) \ u_1(y(k-2)) \ u_2(y(k-2))] \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \right) - \delta_6}{\delta_5 - \delta_6} \quad (18)$$

Como se tiene una partición con funciones de pertenencia triangular y solapamiento en 0.5, tenemos que

$$u_2(x(k)) = 1 - u_1(x(k))$$

Conociendo la función de pertenencia $u_1(x(k))$, se procede a determinar el valor $x(k)$, que es el ángulo de timón que se debe aplicar en el momento k .

A continuación, se presentan los resultados de la respuesta del sistema controlado ante diferentes valores de rumbo deseado, con un modelo de referencia dado por

$$Y_r(1 - e^{-8t})$$

Siendo Y_r el rumbo deseado. Se inicia con un rumbo de 0° (referenciado con el eje del buque, popa a proa, en que se ubica inicialmente), seguido de una orden inicial de cambio de rumbo a $+12^\circ$ (giro a babor). Posteriormente se ordena un giro a estribor para alcanzar $+5^\circ$, seguido de un nuevo giro a babor para alcanzar $+17^\circ$.

El controlador difuso inverso tiene las mismas distribuciones del modelo difuso obtenido, para las variables $y(k-1)$, $y(k-2)$ y $u(k)$, mostradas en la Fig. 24. El ángulo de timón, o señal de control, se calcula empleando la ecuación (18), de la cual se deriva el valor $x(k)$.

La Fig. 25 muestra los resultados alcanzados por el sistema con el controlador difuso ante los cambios de rumbo ordenados. Se utilizó como métrica el error cuadrático medio normalizado, alcanzado en este experimento un valor de 0.0323.

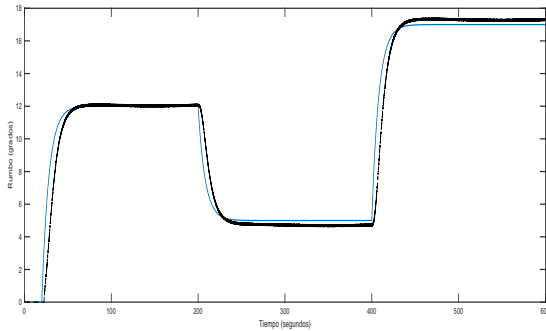


Figura 25. Respuesta del buque con controlador difuso ante solicitudes de cambio de rumbo. Fuente propia del autor.

En el Anexo C, se muestra el código en Matlab para la identificación del modelo matemático.

Una vez tenido este modelo, se puede proceder a implementar los algoritmos de navegación y evasión.

6. ALGORITMOS DE EVASIÓN DE OBSTACULOS.

El algoritmo de evasión de obstáculos implantado, se realizó en el DSPIC y simulación en Matlab para la evasión de Obstáculos.

Como se mencionó anteriormente, en el marco teórico, se va a implementar el algoritmo de Campo de Fuerzas Virtuales para obstáculos fijos y una mejora del mismo algoritmo denominada. MVFF (campo Modificado de Fuerza Virtual),

Al leer los 3 sensores ultrasónicos, es posible encontrar obstáculos sobre la ruta no encontrar ninguno en absoluto, en este último caso el sistema no experimenta repulsión. En el caso de encontrar un obstáculo sobre la ruta del sistema, este será censado, el generará una fuerza en sentido contrario, cuya magnitud depende inversamente de la distancia medida. Teóricamente si encontrara varios obstáculos durante la ruta, se sumarían vectorialmente todas las fuerzas repulsivas y una atractiva que va en sentido de la dirección del *waypoint*, el vector resultante representara el rumbo que debe mantener para evitar colisionar.

Debido a que se aplicó la teoría de campos de fuerza virtuales se deben calcular varias variables como son la fuerza de atracción, fuerza de repulsión, marcación y distancia del obstáculo, distancia al *waypoint*, constantes de repulsión y atracción., la magnitud es inversamente proporcional a la distancia de detección del obstáculo generando que el cambio en el rumbo sea más drástico a medida que el obstáculo se encuentre más cerca.

$$Fr = \frac{1}{d} \quad (23)$$

Fr = magnitud de la fuerza de repulsión.

d = distancia al obstáculo

Para el caso de la fuerza de atracción su magnitud dependerá del ángulo donde se encuentre el obstáculo, su distancia, la fuerza de repulsión y una constante estimada empíricamente que representará el margen de seguridad con la que el USV evade el obstáculo, quedando representada la fuerza de atracción por.

$$Fa = K * Fr * d * \text{abs}(\theta) \quad (24)$$

Fa = Magnitud fuerza de atracción

K = constante de repulsión

= distancia al obstáculo

θ = Angulo de la marcación del obstáculo

Hallados las componentes y magnitudes de F_a y F_r se proceden a sumarse estos dos vectores obteniendo un vector resultante F_t , el ángulo entre vector F_t con respecto a la proa del USV será el rumbo que cambiará con respecto a la navegación, si el ángulo es negativo generara una caída de rumbo a babor y viceversa.

Cuando el obstáculo durante la evasión salga del rango de detección de -40 a 40 grados se iniciará una interrupción del programa de evasión y continuara el programa de seguimiento de ruta.

En la figura 26 se muestra, la simulación en software en Matlab, utilizando la GUI que permite hacerlo de manera gráfica y colocar los waypoints y los obstáculos a evadir. También es configurable la velocidad del vehículo y la ganancia proporcional del control de navegación, y el ítem “waypoint acercamiento” es que tan cerca del objeto debe hacer la evasión.

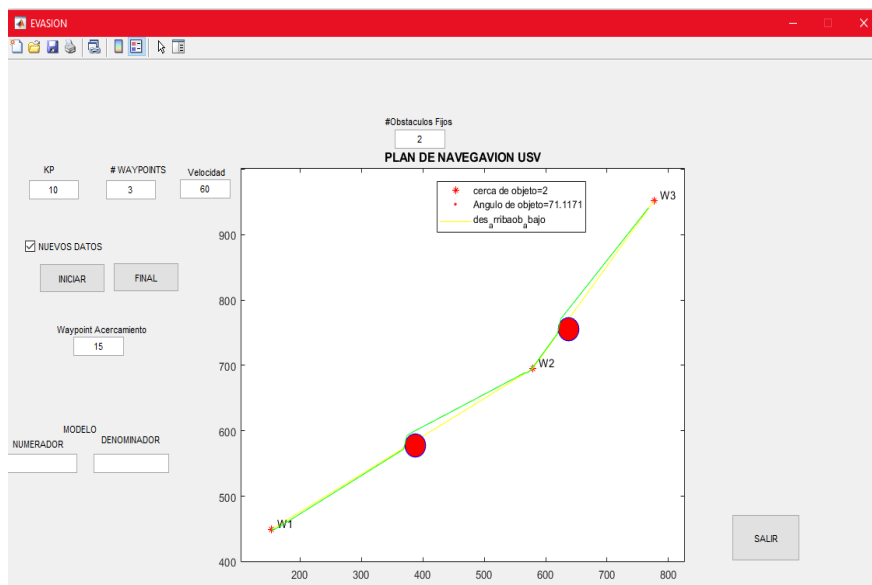


Figura 26. Simulación en Matlab. Fuente propia del autor

En la figura anterior se observa 3 waypoint y dos obstáculos, como el vehículo en verde evita los obstáculos y continua con la trayectoria. Además, se hicieron prueba en la bahía de la ENAP para probar los algoritmos, con total éxito, las figura 27 y 28 muestra el buque real.



Figura 27 y 28. Buque real navegando. Fuente propia del autor

En el Anexo D se muestra el algoritmo de evasión en Matlab.

El algoritmo diseñado en el DSPIC, toma como referencia, la velocidad de buque entregada por el GPS, y cuando aparece un obstáculo, calcula una velocidad estimada, basado en la distancia entregada por el objeto y en tiempo de muestra de 150 ms, del sistema, si esta velocidad estimada está dentro de un margen de 15% de la velocidad del GPS, se tomó como un objeto fijo, de lo contrario, como un objeto móvil, y se procede a realizar el algoritmo de evasión correspondiente, teniendo en cuenta que en la parte móvil, se debe cumplir con las reglas de COLREGs, y se puede ajustar la velocidad del USV, así como la ganancia del controlador de navegación para obtener una evasión exitosa.

En la figura 29 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo de evasión de obstáculo en el DSPIC.

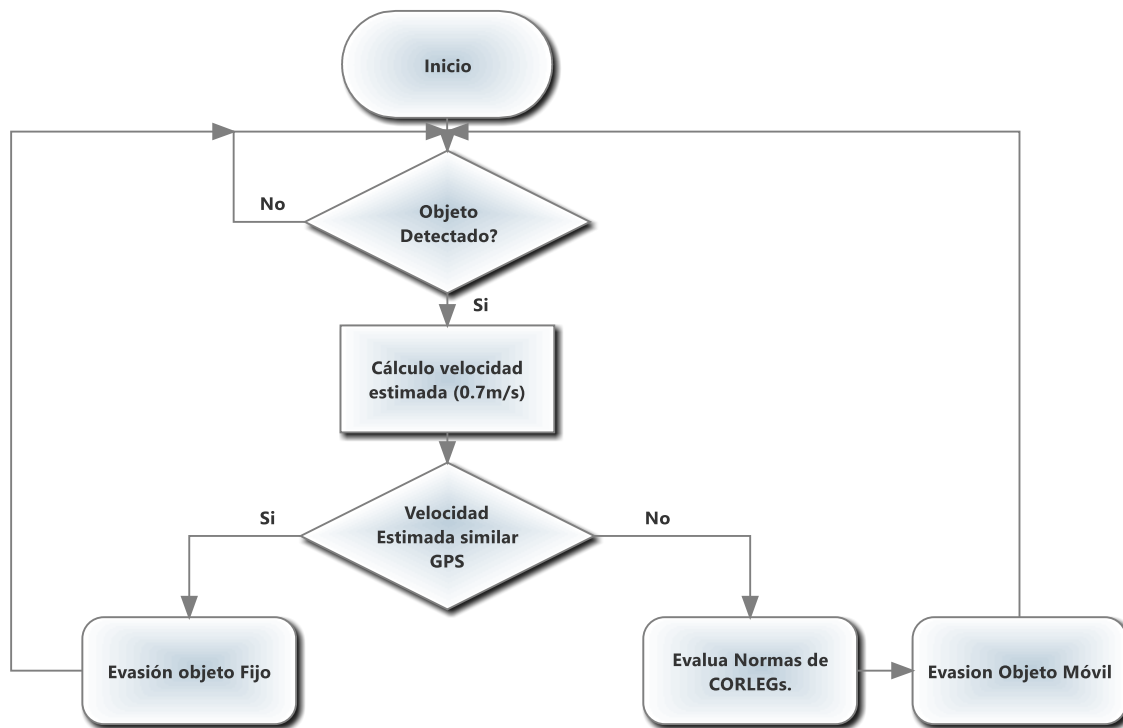


Figura 29. Diagrama de flujo del algoritmo de evasión. Fuente propia del autor.

En link <https://youtu.be/v1YwXrSGGNw>, se muestra cómo funciona el software de evasión en Matlab.

6.1. Análisis de los algoritmos implementados.

Analizando los resultados, obtenidos en las simulaciones, como en la implementación en el DSPIC, se observa la eficacia, de los algoritmos de Campo de Fuerzas Virtuales y el de campo Modificado de Fuerza Virtual. Además, que el dejar configurables, parámetros como la velocidad del buque, y la ganancia del controlador de navegación, refuerzan de manera positiva la correcta evasión tanto de obstáculos fijos como móviles. Todo lo anterior reforzado con el cumplimiento de las normas de COLREGs Para prevenir abordaje entre embarcaciones. Sin embargo, al ser un prototipo de dimensiones reducidas todo está sujeto al ser operado en aguas tranquilas, sin mucho movimiento, ya que esto le dificulta la navegabilidad del USV.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En los anteriores capítulos de este trabajo, se han descrito la metodología para la implementación de los algoritmos de evación de obstáculos en un vehículo de superficie, y como es necesario, primeramente, instrumentar el USV con la sensórica adecuada, y los algoritmos de navegación, que son la base y cimientos, sobre los que se construyen los algoritmos de evación de obstáculos.

7.1. Conclusiones.

Una vez realizado este proyecto, en el cual se utilizó y reforzó muchos de los conceptos de la teoría de control , adquiridos en está maestría de Electrónica, se concluye que este tipo de investigación aplicada, es necesaria, y aporta un grano de arena, al desarrollo tecnológico del país, son poco las instituciones universitarias en Colombia que trabajan en el área de vehículos no tripulados, y siendo la ENAP una Institución de carácter militar, este tipo de desarrollo, aporta a ir logrando de a poco una independencia tecnológica, importante en el ámbito naval, y así una tecnología propia.

Se pudo evidenciar como las etapas de diseño, implementación y validación, se pudieron ver materializada en un vehículo operacional y con mucho por desarrollar, el USV cuenta con un hardware, en el cual además de los algoritmos de navegación y evación de obstáculos implementados, se pueden desarrollar algoritmos más complejos, o agregar más sensórica, que optimicen y den un siguiente nivel a lo logrado, al día de hoy.

Un punto importante para lograr el éxito es este proyecto, fue la compatibilidad electromagnética, ya que debido a que utilizaba varios dispositivos de radiofrecuencia, se tuvieron que seleccionar de tal manera que las frecuencias y posición de cada uno de ellos no interfiriera en nada a electrónica del USV.

El hecho de usar sensores ultrasónicos, se concluye que fue acertado, ya que su robustez, y así su alcance sea solo de 10 metros, debido al tamaño del prototipo, cumplieron de forma exitosa su objetivo en la implementación de los algoritmos de evación de obstáculos.

Este proyecto, más que satisfactorio, es un proyecto integrador, en el cual, el control, las comunicaciones, y la programación entre otros factores, se acoplaron de gran manera, aportando conocimientos, enseñanzas y un prototipo de USV para la ENAP, con capacidad de evasión de obstáculos fijos y móviles.

7.2. Recomendaciones.

Entre Las recomendaciones, se encuentra, cambiar los sensores ultrasónicos por LIDAR, los cuales, agregaran mayor distancia de detección de obstáculos.

Se recomienda, seguir investigando y ver la forma de mejorar los algoritmos de evasión implementados, con técnicas de redes, neuronales, o lógica difusa.

Se recomienda, basado no solo en este proyecto, sino en, los de otros compañeros, que este tipo de alianza entre a Unicacuca y la ENAP, deben ser más seguidos y duraderos, por el bien de la investigación y el desarrollo del país.

En el nuevo proyecto, Sábalo de a ENAP y COTECMAR, el cual es un USV más robusto y de mayor tamaño, y ya aparece en noticias nacionales https://caracol.com.co/emisora/2021/07/13/cartagena/1626180757_809662.html, la idea es trasladar toda esta experiencia adquirida en este prototipo al nuevo USV y mejorarlo, y seguir aportando a la tan anhelada independencia tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] J. C. S. Carrillo, "Obtaining First and Second Order Nomoto Models of a Fluvial Support Patrol using Identification Techniques," *Ship Science and Technology*, vol. 11, nº 22, pp. 19-28, 2018.
- [2] V. V. G. Y. V. O. M. O. O. V. A. Golikov, "simple technique for identifying vessel model parameters," *4th International Scientific Conference SEA-CONF*, vol. 172, nº 1, pp. 1-8, 2018.
- [3] P. Borkowski, "Adaptive System for Steering a Ship Along the Desired Route," *Mathematics*, vol. 6, nº 10, pp. 1-11, 2018.
- [4] I. P. S. V. M. L. N. Assani, "Analysis of the Nomoto ship model response to course changes using PID controller in Matlab/Simulink," *19th International Conference on Transport Science*, pp. 14-18, 2020.
- [5] K. F. Kula, "Automatic control of ship motion conducting search in open waters," *Polish Maritime Research*, vol. 27, nº 4, pp. 157-169, 2020.
- [6] S. B. G. Budak, "Controlled course-keeping simulations of a ship under external disturbances," *Ocean Engineering*, vol. 218, nº 1, pp. 1-12, 2020.
- [7] Y.-H. L. J. D. C.-M. C. W.-J. Chang, "Fuzzy Control with Pole Assignment and Variance Constraints for Continuous-time Perturbed Takagi-Sugeno Fuzzy Models: Application to Ship Steering Systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, nº 10, pp. 1-16, 2019.
- [8] M. H. A. ., A. K. M. H. K. T. D. N. Vafamand, "TS Fuzzy Model-Based Controller Design for a Class of Nonlinear Systems Including Nonsmooth Functions," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 50, nº 1, pp. 233-244, 2017.
- [9] A. Ltd, "Benchmarking in context: Dhrystone," *ARM White Paper*, pp. 1-7, 2002.
- [10] O. BECERRA, Artist, *Control de Motor sin Escobillas*. [Art]. Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga, 2011.

- [11] B. KOREN, "The Vector Field Histogram- Fast," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, nº 4, pp. 535-549, 1991.
- [12] K.-Y. K. J. Sang-Min Lee, "A Fuzzy Logic for Autonomous Navigation of Marine Vehicles Satisfying COLREG Guidelines," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 2, nº 2, pp. 171-181, 2004.
- [13] e. a. S. Campbell, "A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres," *Annual Reviews in Control*, vol. 36, pp. 267-283, 2012.
- [14] R. A. Diaz Meza, *Diseño e Implementación de un Vehículo de Superficie no Tripulado Provisto de un Sistema de Adquisición de Datos en Tiempo Real Para la Inspección de Calidad de Agua y Análisis de Muestras en Lagos, España*, 2019.
- [15] M. TOMERA, "NONLINEAR CONTROLLER DESIGN OF A SHIP AUTOPILOT," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*, vol. 20, nº 2, pp. 271-280, 2010.
- [16] G. W. I. A. Y. Wasif Naeem, "COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 669-678, 2012.
- [17] C. Hwang, "The Integrated Design of Fuzzy Collision-Avoidance and H [infty infinity]-Autopilots on Ships," *THE JOURNAL OF NAVIGATION*, vol. 55, pp. 117-136, 2002.
- [18] A. S. R. Zaccaria, "Planning and obstacle avoidance in mobile robotics," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, nº 4, pp. 628-638, 2012.
- [19] D. P. a. A. J. Widodo Budiharto, "A robust obstacle avoidance for service robot using Bayesian approach," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, nº 1, pp. 37-44, 2011.
- [20] e. a. S. Bhattacharyya, "Fuzzy autopilot for ship maneuvering," *International Shipbuilding Progress*, vol. 58, nº 4, pp. 191-218, 2011.
- [21] P. J. C. Robert Sutton, "A FUZZY AUTOPILOT DESIGN APPROACH THAT UTILIZES NON-LINEAR CONSEQUENT TERMS," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 9, nº 2, pp. 65-74, 2001.

- [22] A. V. S. Hamid Teimoori, "Equiangular navigation and guidance of a wheeled mobile robot based on range-only measurements," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, pp. 203-215, 2010.
- [23] D. Bertin, "U-Ranger - An Unmanned Surface Vehicle for Surface and Underwater Missions," Italia, 2009.
- [24] J. S. DAR. Acosta, "algoritmo bioinspirado de evasión de obstáculos," *Tecnura*, vol. 13, nº 25, pp. 38-48, 2009.
- [25] H. T. AV. Savkin, "Equiangular navigation and guidance of a wheeled mobile robot based on range-only measurements," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, nº 2, pp. 203-215, 2010.
- [26] W. A. C. CELIS, "Diseño e Implementación De Un Sistema De Control De Navegacion Para Un USV," Cartagena, 2011
- [27] B. V. M. Gerardo G. Acosta, "MACÁBOT: Prototipo de Vehículo Autónomo de Superficie," 142(142-154) *Revista Tecnología y Ciencia*, vol. 17, no. 36, pp. 142-154, 2019.
- [28] D. J. y. M. R. Aranda J.Revilla J, "Entorno para el analisis de robustez de controladores en aplicaciones de control de buque," in Dept. de informatica. UNED España, España, 2004.
- [29] D. P. a. A. J. Widodo Budiharto, "A robust obstacle avoidance for service robot using Bayesian approach," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 37-44, 2011.
- [30] J. Colito, "Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned," M.S. thesis: University of Washington, 2007.