



Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Esquema de guiado para el seguimiento de caminos sin restricciones temporales por parte del barco *Krick Felix* en presencia de múltiples perturbaciones.

Autor del trabajo: Angel Alejandro Camero Alvarez

Tutores del trabajo: Ing. Leidys Miranda Jiménez

DrC. Yunier Valeriano Medina

Santa Clara, junio 2018
Copyright©UCLV

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Esquema de guiado para el seguimiento de caminos sin restricciones temporales por parte del barco *Krick Felix* en presencia de múltiples perturbaciones.

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Angel Alejandro Camero Alvarez

Tutor: Ing. Leidys Miranda Jiménez
Dr.C Yunier Valeriano Medina

Santa Clara

2018

“Año 60 de la Revolución”

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“Uno aprende más escuchando que hablando. Y tanto el viento como las personas que continúan viviendo cerca de la naturaleza todavía tienen mucho que decirnos que no podemos escuchar dentro de los muros de la universidad.”

Thor Heyerdahl, Explorador.

DEDICATORIA

A mis abuelos

*Jamás en la vida encontraré ternura mejor, más profunda, desinteresada ni verdadera
que la vuestra,*

A mis padres

Todo lo que soy o espero ser es el fruto de su maravillosa labor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su amor infinito, por depositar en mi toda su fe y su confianza, y por servirme de ejemplo a lo largo de mi vida. A pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado para saber cómo iba mi proceso. Las palabras nunca serán suficientes para testimoniar mi aprecio y agradecimiento.

A mis abuelos, sencillamente por ser mi tesoro máspreciado.

A Valeriano, mi tutor, por su dedicación, preocupación y acertados aportes para que iniciara y concluyera con éxitos esta investigación. Ha sido un privilegio poder contar con su guía y ayuda.

A Leidys, por su apoyo permanente, por su paciencia conmigo, por su dedicación, criterio y aliento. Por hacer fácil lo difícil. Por regalarme su maravillosa amistad.

A mis tíos, mi negra y todos mis familiares, que de alguna manera u otra celebrarán mi éxito. Gracias por estar siempre dispuestos a ayudarme cuando lo necesité.

A Bety, por aguantarme, escucharme y darme ánimos durante el camino.

A todos mis amigos y compañeros de estudio, por compartir conmigo tantas horas de estudio, de clases y trabajos y tantos buenos ratos que no tienen precio. Por todo el tiempo que me han dado, por sus consejos imprescindibles, por los buenos y los malos momentos. A todas aquellas que de una manera u otra han sido claves en mi vida en especial a Lili, Heikel, Ale, Kenlee, Nesty, Viti, Pedro, José Roberto, Lisander, Jota, Xander, Cossio e Iliani.

A todos los profesores que durante la carrera han intervenido en mi formación profesional.

RESUMEN

Los vehículos autónomos de superficie (*USVs, Unmanned Surface Vehicles*) creados actualmente en el mundo se destinan al desarrollo de disímiles misiones. Sus aplicaciones están enmarcadas tanto en la rama militar como en procesos investigativos o comerciales. El sistema de guiado es el responsable de conducir el vehículo a través de una trayectoria. En esta investigación se diseña una estrategia de control usando un controlador *I-LOS* para el seguimiento de caminos formados por segmentos de líneas rectas. Esta estrategia incluye una acción integral que permite contrarrestar los efectos que provocan las perturbaciones en el vehículo, dígame las corrientes marinas y el viento. El ajuste de las ganancias del controlador se realiza en función de las características del vehículo y de la geometría del camino a seguir. La eficacia del método propuesto se valida mediante simulaciones.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DEL CONTROLADOR <i>I-LOS</i> EN VEHÍCULOS MARINOS.	5
1.1. Introducción	5
1.2. Evolución y desarrollo de los <i>USV</i>	5
1.3. Descripción general del <i>Krick Felix</i>	10
1.4. Guiado en vehículos marinos	13
1.5. Controlador <i>I-LOS</i>	17
1.6. Consideraciones finales	20
2. MODELADO MATEMÁTICO DEL VEHÍCULO Y LAS PERTURBACIONES MARINAS	21
2.1. Introducción	21
2.2. Modelo dinámico no lineal	21
2.2.1. Dinámica del cuerpo rígido	24
2.2.2. Términos de masas añadidas	24
2.2.3. Amortiguamiento hidrodinámico	25
2.2.4. Modelo de los Actuadores	25
2.3. Modelo lineal para el subsistema lateral	26
2.4. Modelado de las perturbaciones marinas	28

2.4.1.	Modelado de las corrientes marinas	28
2.5.	Modelado del viento	29
2.6.	Valores del modelo no lineal de 3 GDL para el <i>Krick Felix</i>	30
2.7.	Comportamiento del modelo dinámico no lineal de 3 GDL	31
2.8.	Consideraciones Finales	33
3.	AJUSTE Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CONTROLADOR <i>I-LOS</i>	35
3.1.	Introducción	35
3.2.	Controlador de rumbo	35
3.3.	Algoritmo de guiado basado en la distancia <i>lookahead</i>	36
3.3.1.	Criterio de punto vencido	38
3.4.	Controlador <i>I – LOS</i>	39
3.5.	Ajuste del controlador <i>I-LOS</i>	41
3.6.	Evaluación del ajuste del controlador <i>I-LOS</i> durante el seguimiento de distintas trayectorias	43
3.7.	Evaluación del ajuste del controlador <i>I-LOS</i> ante cambios en las velocidades de las perturbaciones	44
3.8.	Análisis económico	45
3.9.	Consideraciones finales del capítulo	46
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	48
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
A.	FUNCIONES SEMIEMPÍRICAS DE LOS COEFICIENTES DE CARGA DEL VIENTO.	54
B.	CÓDIGO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR <i>I-LOS</i>	56

INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta donde los océanos cubren más de un 71 % de la superficie terrestre, las embarcaciones marinas han jugado un papel muy importante en el desarrollo del hombre y la sociedad. Los vehículos marinos poseen numerosas aplicaciones en actividades como la pesca, como elemento de defensa para una nación o como medio de transporte. El término vehículos marinos incluye barcos, semi-sumergibles, submarinos, vehículos subacuáticos operados remotamente (*ROV*) o autónomamente (*AUV*), torpedos, vehículos autónomos de superficie y otras estructuras propulsadas y energizadas, capacitadas para navegar ([Fossen, 2011](#)).

Con la evolución de los mercados, los servicios y las tecnologías, se ha visto a lo largo de la historia, una transformación progresiva de los vehículos marinos y un redimensionamiento de los mismos. Dentro de los avances tecnológicos, la implementación del control automático en los vehículos marinos es un aspecto que desde principios del pasado siglo ha sido de marcado interés para la comunidad científica. En la actualidad, el creciente desarrollo tecnológico ha propiciado sensores más precisos y reguladores de mayor potencia de cómputo con menor consumo energético. Este desarrollo ha facilitado en gran medida la implementación de sistemas de control automático en dichos vehículos ([Valeriano-Medina, 2017](#)).

Los vehículos autónomos de superficie tienen como principal ventaja que no requieren de apenas intervención humana, permitiendo realizar misiones con mayor grado de eficiencia. Existen múltiples escenarios donde los barcos autónomos pueden ser útiles, algunas de sus aplicaciones abarcan desde tareas de reconocimiento, el estudio del entorno marino, persecución de objetivos, protección, salvamento, o en el despliegue de redes de pesca ([Cruz, 2012](#)). Actualmente diversas universidades y grupos investigativos realizan infinidad de proyectos enfocados en aumentar el desarrollo de estos vehículos y las posibilidades de maniobrabilidad y control de los mismos. Entre ellos se pueden resaltar los siguientes vehículos de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología: *Cybership I* (CS1), *Cybership II* (CS2), *Cybership III* (CS3) ([Fossen, 2011](#)) y el *CART-USSV* ([Caharija, 2014](#)). Estos prototipos han sido utilizados para desarrollar estrategias de control de seguimiento y otras variantes como la estabilización de barcos usando control integral, para mejorar las compensaciones de las perturbaciones.

Toda embarcación de este tipo presenta un sistema de control de movimiento que le permite operar de forma autónoma. Este está compuesto por un sistema de guiado, un sistema de navegación y un sistema de control. En esta investigación el interés recae en el sistema de guiado, ya que su objetivo fundamental es proporcionar de forma continua al controlador el estado de las referencias necesarias (posición, velocidad y aceleración) para que el vehículo recorra la ruta precisa (Fossen, 2011).

Un aspecto que debe definirse es el escenario de guiado a utilizar, en este caso se selecciona el seguimiento de camino (*Path Following, PF*). En el seguimiento de camino solo se toman en cuenta las restricciones espaciales y su objetivo es hacer que el vehículo se dirija en dirección al camino. De los diferentes caminos que se utilizan, el seguimiento de líneas rectas, es el caso más simple y el que interesa para el desarrollo de este trabajo.

En Cuba, el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (*GARP*) de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, trabaja en el estudio de vehículos marinos en las temáticas de modelado, control y guiado. El sistema de guiado es una pieza importante para lograr la autonomía de un vehículo marino no tripulado. En este sentido, el *GARP* ha desarrollado numerosas investigaciones que desembocan en múltiples propuestas de estrategias de guiado para el vehículo sumergible *HRC-AUV* (Valeriano-Medina, 2017; Miranda, 2016).

En dichos trabajos quedó demostrado que la utilización de una estrategia de guiado basada en un controlador *I-LOS* permite el seguimiento de caminos en línea recta. Con la introducción de una acción integral en la ley de guiado se logró reducir el error de seguimiento que provocan las corrientes marinas.

Actualmente una de las líneas de investigación del grupo está enmarcada en el desarrollo del barco robótico *Krick Felix*. Este vehículo es sub-actuado pues posee mayor número de grados de libertad que de actuadores. El propósito que se persigue es contar con una maqueta donde se puedan probar algoritmos de control, guiado y navegación con el fin de extender las posibilidades de maniobrabilidad durante el desarrollo de diferentes misiones (Balanza, 2017). Hasta el momento en los estudios realizados por el *GARP*, enfocados al sistema de guiado de vehículos autónomos, solo se ha tenido en cuenta como perturbación que incide sobre el vehículo a las corrientes marinas. En esta tesis, además de las corrientes marinas, interesa contrarrestar el efecto que provoca el viento durante el seguimiento de caminos rectos por parte del barco robótico *Krick Felix*, ya que a diferencia del *HRC-AUV*, este es un vehículo de superficie y se encuentra constantemente afectado por las acciones del viento.

Las investigaciones anteriormente realizadas, demuestran que el diseño y ajuste de un esquema de guiado basado en controladores *I-LOS* asegura reducir el error de seguimiento de camino provocado por el efecto de las perturbaciones marinas que inciden sobre el vehículo. Sin embargo, en el vehículo de superficie *Krick Felix* no se cuenta con un esquema de guiado que asegure precisión durante el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales y bajo la influencia de múltiples perturbaciones. Por lo que se plantea el siguiente problema científico.

Problema científico:

Debido al efecto que sobre la navegación provocan las corrientes marinas y el viento, se necesita evaluar si el esquema de guiado *I-LOS* asegura precisión durante el seguimiento de caminos rectos para el caso del vehículo sub-actuado *Krick Felix*.

Con esta investigación se pretende cumplir los siguientes objetivos:

Objetivos:

Objetivo general: Diseñar un esquema de guiado basado en el controlador *I-LOS* que asegure la reducción del error perpendicular al camino provocado por las corrientes marinas y el viento en el vehículo de superficie *Krick Felix*.

Objetivos específicos:

1. Establecer las soluciones de guiado que se reportan en la literatura para el caso de vehículos marinos.
2. Evaluar mediante simulación las afectaciones que provocan las corrientes marinas y el viento en la dinámica del *Krick Felix*.
3. Ajustar los parámetros del controlador *I-LOS*.
4. Evaluar mediante simulación el desempeño del esquema de guiado durante el seguimiento de caminos rectos en presencia de corrientes marinas y viento.

Hipótesis:

Un esquema de guiado basado en un controlador *I-LOS*, garantiza precisión durante el seguimiento de caminos rectos por parte del vehículo *Krick Felix*, a pesar de la presencia de corrientes marinas y viento.

Tareas de investigación:

- Revisión en la literatura especializada de los aspectos teóricos relacionados con la temática.
- Estudio de la dinámica del vehículo *Krick Felix*.

- Estudio de las afectaciones que provocan el viento y las corrientes marinas en el vehículo *Krick Felix*.
- Obtención de representaciones matemáticas para las corrientes marinas y el viento.
- Implementación en la estructura del modelo no lineal del *Krick Felix* de las representaciones matemáticas obtenidas para el viento y las corrientes marinas.
- Evaluación mediante simulación del efecto que provocan las corrientes marinas y el viento en el movimiento del *Krick Felix*.
- Estudio de la estructura del controlador de rumbo diseñado para el vehículo.
- Ajuste del controlador *I-LOS* que forma parte del sistema de guiado.
- Implementación en el software *Matlab* del esquema de guiado.
- Evaluación mediante simulación en *Matlab* de los resultados del esquema de guiado durante el seguimiento de caminos rectos.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

Los resultados de la investigación poseen una aplicación práctica y teórica de gran trascendencia para los vehículos marinos con los que trabaja el *GARP*. Al finalizar la investigación se contará con un esquema de guiado que permitirá el seguimiento de caminos rectos. La solución tendrá en cuenta las afectaciones que provocan las corrientes marinas y el viento.

Capitulario : La investigación incluye tres capítulos, además de la introducción, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo I: A partir del estudio realizado en la bibliografía se presentará un resumen de los aspectos fundamentales de los vehículos de superficie. Se realizará una descripción del proyecto *Krick Felix* y se abordarán las posibles soluciones de guiado que se proponen, con énfasis en las que logran reducir el error perpendicular que producen las perturbaciones.

Capítulo II: En este capítulo se define la nomenclatura, sistemas de coordenadas y variables a emplear. Se presentarán los modelos matemáticos que describen la dinámica del *Krick Felix* y de las múltiples perturbaciones que afectan al vehículo. Finalmente, se expondrá el comportamiento del modelo con la inclusión de las perturbaciones.

Capítulo III: En este capítulo se abordarán los aspectos relacionados con el algoritmo de guiado a implementar en el vehículo de superficie *Krick Felix*, dígame las ecuaciones relacionadas con el controlador *I-LOS*. Serán mostrados y analizados los resultados de las simulaciones durante el seguimiento de caminos rectos en presencia de múltiples perturbaciones. Por último, se presentará el análisis económico de la investigación.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DEL CONTROLADOR *I-LOS* EN VEHÍCULOS MARINOS.

1.1. Introducción

En este capítulo se tratan los aspectos fundamentales relacionados con el modelado y control de vehículos marinos, a partir de la base de una revisión bibliográfica actualizada. Se inicia haciendo referencia al estado del arte de los vehículos autónomos de superficie y las aplicaciones de los mismos. Seguidamente se ofrece una descripción física del vehículo *Krick Felix*, a la que se le añaden los datos relacionados con el equipamiento electrónico y sensorial implementado en el mismo.

Por otra parte, se exponen algunos aspectos esenciales del modelado de embarcaciones marinas. Luego se abordan los aspectos fundamentales relacionados con el guiado de vehículos marinos, destacando el uso de la estrategia *LOS*. Para finalizar se realiza un análisis de la solución de control *I-LOS* basado en un acercamiento a investigaciones de carácter internacional y nacional.

1.2. Evolución y desarrollo de los *USV*

El proceso de automatizar la dirección de los barcos tiene sus orígenes en la época en que los primeros pescadores atarían la caña del timón o el timón de sus barcos en una posición fija para producir un curso óptimo, así liberar mano de obra adicional para ayudar con el lanzamiento y recuperación de redes. Lo más probable es que el criterio para seleccionar el curso óptimo fuese minimizar movimientos inducidos, para mantener un curso que ayudaría con el despliegue o recuperación de las redes ([Sutton, 2006](#)).

Los *USV* son embarcaciones que operan en la superficie del agua sin ningún tipo de tripulación. Se controlan de forma remota y pueden ser controlados por un operador localizado en tierra o abordo de otra embarcación. Son de gran importancia en el área naval, y dependiendo de las características y funcionalidades que posean pueden tener un alto o bajo costo ([Valeriano-Medina, 2013](#)).

Una parte esencial de cualquier *USV* es un sistema de control automático a bordo para dirigir un rumbo fijo o mantener una posición determinada. No fue hasta la revolución industrial que los métodos para dirigir automáticamente los buques se contemplaron por primera vez. Los primeros pilotos automáticos no se utilizaron hasta la primera parte del siglo XX. Aun así, antes de que el desarrollo de los pilotos automáticos pudiera progresar, era necesario idear un timón con motor o un motor de dirección. La motivación para un motor de dirección vino principalmente del requisito naval para que los buques de guerra emprendan maniobras de alta velocidad. Bennett ([Bennett, 1993](#)), en su capítulo sobre el desarrollo de servo mecanismos, informa que a fines de la década de 1860 el Almirantazgo británico equipó varios de sus veleros con diversos tipos de motores de dirección, muchos de los cuales se basaban en un sistema hidráulico de vapor. Una vez que los timones accionados o las máquinas de dirección se volvieron comunes, la atención recurrió a la provisión de insumos para estos dispositivos a partir de un equipo adecuado para la búsqueda de rumbo. Fossen ([Fossen, 1994](#)) describe cómo el desarrollo del giroscópico conducido eléctricamente fue fundamental en la evolución de los pilotos automáticos.

El uso de giróscopos accionados eléctricamente superó los problemas asociados con las brújulas magnéticas que tenían sus lecturas corrompidas por los campos magnéticos locales y los sistemas eléctricos en barcos, torpedos y submarinos. El primer giroscopo impulsado eléctricamente se demostró en 1890, en 1908 Anschutz patentó el primer girocompás en busca del Norte y en 1911 Sperry patentó su brújula balística, que incluía amortiguación vertical. La invención del girocompás con accionamiento eléctrico es posiblemente el avance más importante en diseño de sistemas de control de buques ([Fossen, 1994](#)).

Durante el primer cuarto del siglo XX fueron ideados una serie de sistemas de dirección automática para barcos. La idea de “*check helm*” o acción derivada fue presentada por Sir James Henderson a quien se le concedió una patente en 1913 por su “dispositivo de dirección automática” que utilizaba el error de cabeceo para controlar la dirección del vehículo. Sin embargo, las principales contribuciones al desarrollo de los prácticos sistemas de dirección de buques fueron fabricados por *Sperry Gyroscope Company*. Allensworth ([Allensworth, 1999](#)) describe cómo Elmer Sperry construyó la primera nave con mecanismo de dirección automática en 1911 que llamó el piloto automático o *gyropilot* ([Sperry, 1922](#)). El piloto automático de Sperry era conocido como *Metal Mike*, este apareció para replicar las acciones de un timonel experimentado. Sperry observó que un timonel experimentado reducía el ángulo del timón a medida que se reducía el error de rumbo y aplicaba el timón contrario para anular la posibilidad de sobrepasar el rumbo. Para tener en cuenta estas acciones humanas, incluyó un “anticipador” que

ajustó automáticamente la reacción del controlador de acuerdo con el ángulo del rumbo, lo que resultó en un piloto automático adaptativo simple.

El trabajo de Minorsky ([Minorsky, 1922](#)) también se considera que hace contribuciones claves al desarrollo de sistemas automáticos de dirección de buques. La principal contribución de Minorsky fue el análisis teórico de la dirección automática y la especificación de los tres términos o controlador proporcional-integral-derivado (*PID*) para la dirección automática de la nave. Como en el caso del trabajo de Sperry, sus diseños de controlador *PID* se basaban en la observación visual de la forma en que el timonel experimentado dirigiría un barco. Él reconoció que los timoneles anticiparían los movimientos del barco antes de aplicar las correcciones del timón, pero más importante aún, postuló que poseían la capacidad de juzgar la velocidad angular, es decir, tasa de guiñada, afectando así el control derivado. De hecho, vale la pena señalar que la capacidad de un operador humano para estimar la velocidad innatamente ahora es ampliamente aceptada en la investigación de factores humanos.

Los *USV* no son una invención moderna y se han llevado a cabo varios proyectos desde la Segunda Guerra Mundial, lo que ha llevado a la construcción y operación de varios *USV* controlados por radio. Estos primeros sistemas de *USV* se usaron principalmente como sistemas de artillería de puntería y misiles. Algunas aplicaciones remotas de barrido minero se desarrollaron en los años 1950 y 1960 y otros sistemas de monitoreo experimental y sistemas de ataque se han informado de vez en cuando.

Ciertamente, han existido y todavía existen significativas diferencias filosóficas en como las distintas organizaciones ven el potencial de los sistemas no tripulados en diferentes roles operativos. Si bien los beneficios de poder insertar sistemas no tripulados en entornos de alta amenaza sin poner en peligro a los operadores humanos son bien conocidos, sigue siendo necesaria una seria consideración del uso de los *USV* dentro de una gama más amplia de roles. La experiencia con otros sistemas no tripulados ha contribuido a una mejor comprensión de cómo los desarrollos tecnológicos desde finales de la década de 1980 pueden integrarse para producir mejoras en los sistemas no tripulados haciéndolos confiables y efectivos dentro del espacio marítimo.

Desde días pioneros que se mencionaron brevemente más arriba, el interés mundial está acelerando el diseño y desarrollo de vehículos marinos no tripulados (*UMV*), ya que muchos consideran que pueden ofrecer soluciones rentables a una gran cantidad de vehículos comerciales, problemas navales y científicos. La atención que ahora se presta a estos vehículos también se combina con los constantes avances que existen dentro de la ingeniería de sistemas de control, la rama de inteligencia artificial y tecnología de sensores, junto a la disponibilidad de sistemas informáticos de bajo costo que tienen

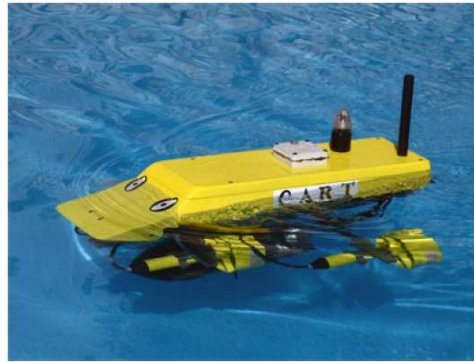
especificaciones de alto rendimiento y el advenimiento de las redes de comunicación como el sistema de posicionamiento global (GPS).

Durante los últimos 30 años se han desarrollado a lo largo de todo el mundo infinidad de investigaciones ligadas al desarrollo de este tipo de embarcaciones. A medida que se avanza en el estudio del mar van apareciendo nuevas aplicaciones singulares en las que se requieren adaptar y diseñar nuevas prestaciones dinámicas y de control de navegación para los vehículos. Una de las aplicaciones de los vehículos marinos autónomos es la medición de variables marítimas, donde se requiere que el barco navegue autónomamente siguiendo una trayectoria deseada de manera que se pueda obtener una serie de datos marítimos para su análisis posterior. Desde el punto de vista del control del barco, el objetivo es seguir la trayectoria con el menor error posible, de manera que se logre cumplir con la tarea de obtención de la serie de datos.

El primer vehículo representativo en el grupo de vehículos autónomos de superficie fue el “*ARTEMIS*”, desarrollado en la década de los 90 por el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Otros ejemplos fueron el “*Dolphin*” desarrollado por la Universidad de Rostock (Alemania) ([Caccia, 2008](#)), el barco “*Caravela*” desarrollado por el laboratorio *DSOR* de Lisboa *ISTISR* ([Sutton, 2006](#)), y el catamarán autónomo “*Charlie*” de *CNR-ISSIA* Genova, Italia ([Caccia, 2005](#)).

USV ARTEMIS (Figura 1–1 (a)): Desarrollado a través del programa *MIT Sea Grant College* en 1993, este vehículo es una réplica a escala de un pequeño barco pesquero. Se utilizó para estudiar arquitecturas de control, los sistemas de navegación y las técnicas básicas de recopilación de datos ([Manley, 1997, 2008](#)). Este vehículo demostró con éxito la capacidad de operar de forma autónoma y recopilar datos hidrográficos. *ARTEMIS* sirvió bien como una plataforma de prueba, pero su pequeño tamaño lo hizo inadecuado para la investigación costera y de mar abierto. Las operaciones de campo de *ARTEMIS* se limitaron al Río Charles, una región de interés científico limitado ([Campbell, 2012](#)).

USV CYBERSHIP II (Figura 1–1 (b)): Es una réplica a menor escala de un buque en operación ([Skjetne, 2004](#)) esta maqueta ha sido desarrollada por la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Posee dos hélices principales, dos paletas o timones ubicados en popa, y una tercera hélice de proa. A bordo cuenta con un sistema empujado que trabaja a 300 MHz. En el mismo corre el Sistema Operativo de Tiempo Real *QNX*, el cual junto a microcomponentes Photon y paquetes de desarrollo GNU (*GNU's Not Unix*) conforma la Plataforma de Tiempo Real *QNX (RTP)*. Se han realizado distintas propuestas de control para este vehículo, entre ellas está el desarrollo de una variante de posicionamiento dinámico, que mejora las compensaciones de las perturbaciones, introduciendo para ello una realimentación de la aceleración ([Lindegaard, 2003](#)). Por

(a) *USV ARTEMIS*(b) *USV CYBERSHIP II*(c) *USV CART-USSV*Figura 1–1: Proyectos de *USV*.

su parte Caharija propone emplear en este vehículo el uso de un controlador I -LOS para el seguimiento de caminos rectos (Caharija, 2014).

USV CART-USSV (Figura 1–1 (c)): Este vehículo ha sido desarrollado para operaciones de remolque de emergencia en Italia por *CNR-ISSIA* en cooperación con otros socios internacionales. Es una plataforma robótica de 0.9 m de largo y 0.75 m de ancho. El empuje es provisto por cuatro motores *brushless* CD (corriente directa) acoplados a hélices de 4 palas. En particular, el *USSV* está equipado con una computadora de placa única funcionando con una aplicación de control en tiempo real basada en *GNU / Linux*, un sistema de GPS que proporciona medidas de posición y un sistema de referencia de actitud y rumbo (AHRS)(Caharija, 2014). Con el fin de explotar el vehículo *CART* como una plataforma para el desarrollo de técnicas avanzadas de navegación, guiado y control, la arquitectura de control de software del vehículo de superficie *CNR-ISSIA Charlie*, se ha personalizado y transferido en el *CART USSV*. En esta embarcación se ha desarrollado la propuesta de control I -LOS para contrarrestar el efecto provocado por

múltiples perturbaciones marinas en el sistema de guiado (Bibuli, 2012, 2014; Caharija, 2014).

1.3. Descripción general del *Krick Felix*

A partir de la colaboración entre el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CID-NAV) y el GARP, surge en el 2009 el primer intento de desarrollar un prototipo de vehículo marino no tripulado (HRC-AUV). Para darle continuidad al estudio de este tipo de vehículos el GARP adquiere a finales del 2016 el barco robótico *Krick Felix* (Figura 1-2), con el propósito de contar con un prototipo de embarcación donde se puedan probar algoritmos de control, guiado y navegación. El *Krick Felix* es un modelo a escala de un buque del puerto de Hamburgo, en Alemania. Este barco, construido en el año 1960, ha sido usado para operaciones portuarias y transportación.



Figura 1-2: Barco robótico *Krick Felix*.

El casco está fabricado con un material conocido como *Acrilonitrilo Butadieno Estireno* de alta calidad, dispone de una quilla moldeada para facilitar la instalación del timón. A su vez la línea de agua marcada en el casco facilita la instalación de la cubierta. Para su movimiento la embarcación cuenta con un motor eléctrico y una propela acoplada. Los datos geométricos, físicos e inerciales del vehículo aparecen en la Tabla 1-1.

El *Krick Felix* originalmente brinda la posibilidad de pilotar la embarcación de forma manual. Para ello cuenta con una estación de radio-control DEVO RX701 a bordo. Este módulo de radio posee un espectro de expansión de secuencia directa de 2.4 GHz que provee una reacción rápida y protección anti-atascamiento. Para la conexión de este módulo se utiliza un codificador PPM (*Pulse Position Modulation*) V2 - Fishbonne. La función del mismo es agrupar diferentes señales PWM (*Pulse Width Modulation*) en una.

Tabla 1–1: Datos geométricos, físicos e inerciales del *Krick Felix* (Balanza, 2017).

Parámetros	Descripción	Valor
m	masa	0.8 kg
u_0	velocidad crucero	1.2 m/s
L	largo	0.634 m
B	ancho	0.128 m
r	radio	0.317 m
T	Calado	0.035 m
I_z	momento de inercia	0.032 kgm^2
BG	distancia entre el CG y el CF	$[0, 0]^T$

Para lograr el comportamiento autónomo de un vehículo, resulta necesario incorporarle elementos de cómputo y sensores (Fossen, 2011). El *Krick Felix* posee una arquitectura de *hardware* sencilla, de bajo costo y basada en dispositivos de fácil adquisición y mantenimiento.

El sistema de comunicación y control está compuesto por una computadora que se encarga de monitorear la embarcación, transmitirle órdenes para la navegación autónoma y obtener los datos de los sensores.

Los elementos de *hardware* instalados a bordo de la embarcación se enuncian en la Tabla 1–2.

Tabla 1–2: Componentes electrónicos (Balanza, 2017).

Elementos
Pixhawk (Px4 Autopilot)
Módulo GPS + Compass (Ublox M8N)
Módulo de telemetría (3DR 433 MHz)
Módulo de radio (DEVO RX701 2.4 GHz)
Codificador PPM (PPM encoder V2 - Fishbonne)
Motor DC de 7.4 Volts
Servo motor digital (Robbe FS61bb de 4.8 - 6 Volts)

Como *hardware* de control para el vehículo se elige el autopiloto *Pixhawk Px4*. El *Pixhawk* es una placa diseñada para el control remoto de vehículos, el mismo está preparado para procesar los datos provenientes de los sensores, motores y actuadores que se encuentran a bordo del barco. Posee una serie de sensores integrados para conocer con mayor precisión las principales variables que definen el comportamiento de la embarcación (Balanza, 2017). Estos son:

- Giróscopo ST Micro 16-bit.
- Acelerómetro/Magnetómetro St Micro 14-bit.

- Barómetro MEAS.
- Acelerómetro/Magnetómetro MPU6000.

Para administrar la potencia necesaria que se le suministra al controlador y a los demás elementos a bordo se cuenta con una batería de litio de 7.4 V. El motor DC utilizado puede girar hasta *600 rpm*. El mismo tiene acoplado un servo motor digital Robbe FS61bb de 4.8 - 6 V. El *software* que se ejecuta en la *laptop* se utiliza como herramienta de supervisión y configuración a distancia del vehículo. Este programa es conocido como *Mission Planner*. *Mission Planner* es un *software* de configuración, supervisión, simulación y control de las plataformas *ArduPilot*. Es compatible con *Windows* y puede ser utilizado para la configuración o como suplemento para el control dinámico de un vehículo autónomo (Balanza, 2017). Entre las principales funcionalidades que brinda este *software* se encuentran (ArduPilot, 2016):

- Permite monitorear el estado del vehículo durante la ejecución de la misión.
- Posee una interfaz de configuración, ajuste y auto-ajuste de los controladores internos que rigen el desempeño de los vehículos.
- Brinda la posibilidad de operar el vehículo en modo vista en primera persona *First Person View*.
- Permite planificar, salvar y recuperar misiones autónomas en los autopilotos soportados valiéndose de la información provista por el servicio global de mapas *Google Maps*.
- Proporciona una interfaz para conectarse con simuladores de vuelo tales como *Flight Gear* o *X-Plane* y llevar a cabo simulaciones HIL (*Hardware in the loop*) sobre las placas de *ArduPilot*.
- Posee una interfaz para cargar *firmwares* de los proyectos *ArduPlane*, *Rover* y *ArduCopter* en las placas soportadas por *ArduPilot*.



Figura 1–3: Elementos de hardware implementados en el *Krick Felix* (Balanza, 2017).

La arquitectura de *hardware* y *software* es la que respalda la realización de pruebas experimentales con el *Krick Felix*, que tienen como propósito el cálculo de los coeficientes hidrodinámicos que forman parte del modelo del vehículo (Figura 1–3).

1.4. Guiado en vehículos marinos

Los *USV* son diseñados con una adecuada economía para operar con seguridad y fiabilidad, para lograr esto, la obtención del modelo matemático del vehículo y el sistema de guiado del mismo, tienen vital importancia en el movimiento de un vehículo marino de este tipo.

El modelado de vehículos marinos constituye una tarea necesaria y compleja. Las ecuaciones de movimiento son utilizadas para simular barcos, embarcaciones de alta velocidad, vehículos submarinos y estructuras flotantes, y diseñar sus correspondientes controladores. De la exactitud y precisión que se logre en el modelo, depende en gran medida el cumplimiento satisfactorio de las misiones que se le asignen al vehículo (Valeriano-Medina, 2017).

Los movimientos de una embarcación marina se encuentran afectadas por el viento, las olas y las corrientes marinas (Fossen, 2011). Este hecho añade una complejidad distinta con respecto a los vehículos terrestres o aéreos, de modo que, además de las ecuaciones dinámicas de un cuerpo rígido, hay que tener en cuenta los efectos hidrostáticos e hidrodinámicos (Cruz, 2012).

Existen distintos procedimientos para determinar los parámetros de los modelos de los vehículos marinos y todos suponen un modelo matemático del vehículo (Cruz, 2012):

- Experimentación con modelos a escala (Skjetne, 2004; Nielsen, 2016; Brodtkorb, 2015).
- Métodos analíticos y semi empíricos (Hegrenaes, 2007; da Silva, 2007; Liang, 2013).
- Métodos numéricos de dinámica de fluidos (Haghighi-Fard, 2015; Stern, 2013; Pan, 2012).
- Métodos de identificación (Ahmad, 2015; Blanke, 2006; Tiano, 2007).

Estos procedimientos no son excluyentes entre sí y pueden utilizarse de forma combinada para determinar todos los parámetros del modelo.

En el caso de la obtención del modelo dinámico del *HRC-AUV* se obtuvo a partir de utilizar un método analítico y semi-empírico complementado con técnicas de identificación experimental (Valeriano-Medina, 2017). Este proceso de modelado dio como resultado un modelo no lineal de 6 GDL empleado en tareas de simulación y dos modelos desacoplados de tres grados de libertad (GDL) para el ajuste de los controladores de rumbo y profundidad. La validez de los modelos ha sido evaluada mediante simulación y pruebas experimentales con el vehículo.

En el trabajo realizado por Claudia Balanza ([Balanza, 2017](#)), el modelo de 3 GDL del *Krick Felix* también se obtuvo a partir de utilizar un método analítico y semi-empírico complementado con técnicas de identificación experimental, donde se tuvieron en cuenta solo las características del vehículo, sin añadirle el efecto de las perturbaciones marinas.

Por su parte los sistemas de control de movimiento son propios de vehículos móviles tanto terrestres, acuáticos, aéreos o espaciales. Actualmente están formados, como se aprecia en la Figura 1-4, por un sistema de guiado, un sistema de navegación y un sistema de control ([Fossen, 2011](#)). Todos estos sistemas presentan objetivos y funciones particulares. En la presente investigación el sistema de guiado constituye el eje fundamental, para su correcto entendimiento es necesario entonces, partir de sus conceptos esenciales.

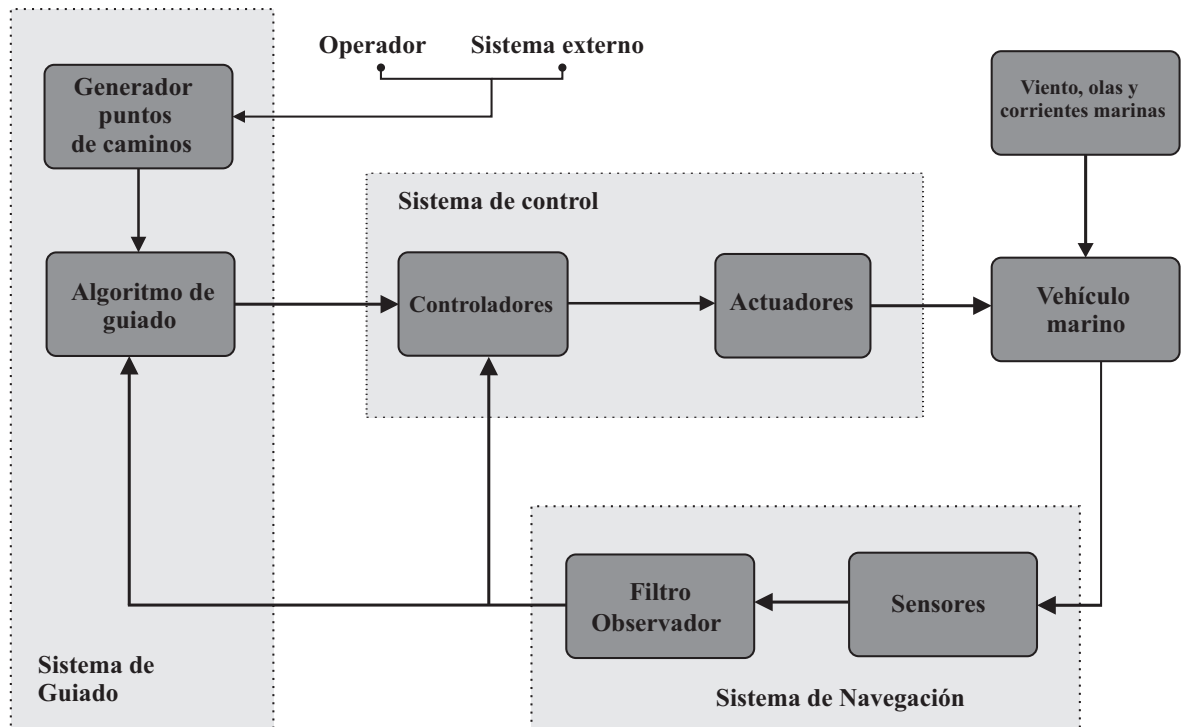


Figura 1-4: Esquema general del sistema de control de movimiento para un vehículo marino ([Valeriano-Medina, 2017](#)).

El sistema de guiado es el que determina el curso, la posición y la velocidad del vehículo, relativo a un sistema de referencia inercial (usualmente ubicado en tierra) ([Fossen, 1994](#)). Generalmente el sistema de guiado se divide en dos componentes fundamentales, la planificación de caminos y su seguimiento.

El bloque de seguimiento es el encargado de calcular las referencias adecuadas para mantener al vehículo en el camino, o que lo conduzca a la ruta si el error de posición es diferente de cero. Mientras que el bloque de planificación determina la ruta que el *USV* debe seguir en aras de completar su misión ([Cruz, 2008](#)). Un aspecto importante lo

constituye la geometría del camino que se debe seguir, dígame caminos rectos o caminos curvos. El seguimiento en línea recta por parte de un vehículo marino es el caso más simple, para esta geometría el error perpendicular al camino varía con el tiempo, pero el ángulo tangencial al mismo permanece constante (Lekkas, 2014). Este caso es el que se ha estudiado mayormente y es de interés en esta investigación.

Según el tipo de maniobra que se desee realizar, debe seleccionarse el escenario de control. Dichos escenarios se pueden clasificar en función de si están basados en una ruta o no (Breivik, 2008):

- Seguimiento de un objetivo móvil *TT* (*Target Tracking*). Sigue la posición de un objetivo, del cual solo se conoce su movimiento instantáneo. Resulta imposible, en estos casos, separar las restricciones temporales y espaciales relativas al objetivo.
- Seguimiento de camino sin restricciones temporales o *PF* (*Path Following*). Su objetivo de control es seguir un camino predefinido. Solo involucra restricciones espaciales.
- Seguimiento de un objetivo a lo largo de una trayectoria o *PT* (*Path Tracking*). Sigue un objetivo que se encuentra moviéndose a lo largo de un camino predefinido. Para su estudio es posible separar las restricciones temporales de las espaciales.
- Maniobrabilidad (*Maneuverability*). Trata de optimizar el camino a seguir. En este escenario se priorizan las restricciones espaciales sobre las temporales.

Puede encontrarse una diferencia apreciable al comparar el seguimiento de objetivo y el seguimiento de caminos: en este último se consiguen convergencias más suaves y señales de control menos propensas a la saturación (Aguilar, 2004).

Según sea el tipo de escenario, pueden utilizarse estrategias de guiado de tipo geométrica o de control (Breivik, 2008). Diversas investigaciones se han referido a las estrategias de control en el guiado de vehículos marinos. Zhen Li (Li, 2009), propone en su artículo seleccionar la estrategia de control predictivo basado en modelo (MPC) para el seguimiento de trayectos por parte de vehículos marinos de superficie, donde se manipula el timón, en función de las restricciones de balanceo, así como las limitaciones de la amplitud y velocidad del vehículo. Otro ejemplo se presenta en el artículo de Sung Woo Jun (Jun, 2012), en este se propone una estrategia de control basado en un sistema de control difuso para el guiado de un *AUV* en el plano vertical. En el trabajo realizado por S. Park (Park, 2004), el autor aborda el *PT* empleando un esquema de guiado cuyo comportamiento es semejante a un controlador *PD* para el seguimiento de caminos rectos, e incorpora un elemento de control adicional cuando el seguimiento se realiza para caminos curvos.

Las estrategias de guiado del tipo geométricas que se pueden implementar en un vehículo para cumplir los escenarios descritos anteriormente (Breivik, 2007) se detallan a continuación y aparecen definidas en la Figura 1–5:

Línea de Visión (*Line of Sight, LOS*): Conformada por tres puntos (referencia, interceptor, objetivo). Se basa en la existencia de un vector en línea recta que se intercepta con la línea de visión que existe entre la referencia y el objetivo.

Persecución (*Pure Pursuit, PP*): es un esquema de guiado de dos puntos (interceptor y objetivo), que supone alinear la velocidad del interceptor con la del objetivo a través de una línea de visión entre ambos.

Dirección Constante (*Constant Bearing, CB*): semejante al esquema de guiado *PP*, supone alinear el interceptor en dirección a la velocidad relativa respecto al objetivo a lo largo de una línea de visión entre ambos.

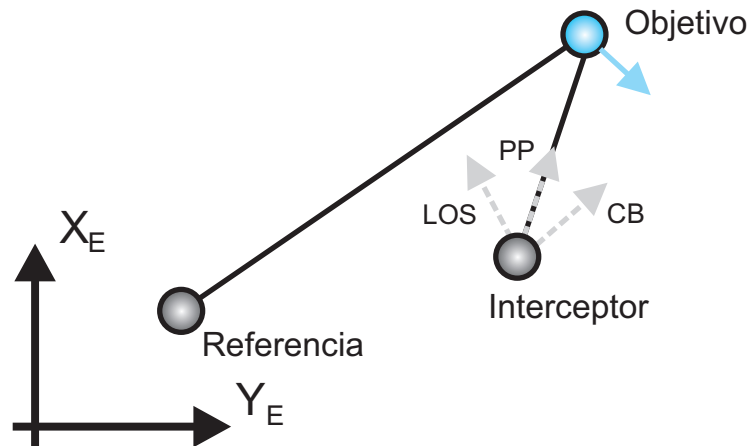


Figura 1–5: Principales estrategias de guiado: LOS, PP, CB (Miranda, 2016).

Utilizando las distintas estrategias geométricas existentes se pueden encontrar varios trabajos, ejemplo de ello son: Simakis (Simakis, 1992), plantea la estrategia de guiado tipo *PP* para generar las referencias que luego se utilizan para ajustar un controlador de rumbo tipo *P-D*. En el trabajo de Belleter (Belleter, 2015) se propone el uso de la estrategia de guiado tipo *CB* donde el objetivo es sincronizar el movimiento de dos vehículos, donde un vehículo actúa como referencia del otro.

El algoritmo de guiado *LOS* constituye uno de los más empleados para el seguimiento de caminos por parte de los *USV*. Los términos de objetivo e interceptor son adoptados de la industria armamentista y específicamente en las tareas relacionadas con el lanzamiento de misiles, al igual que mucho de los conceptos referidos al guiado. (Breivik, 2007). Para lograr el seguimiento de caminos formados por segmentos en línea recta se pueden emplear alguna de las siguientes leyes:

- Ley de dirección basada en el encierro circular del camino.

- Ley de dirección basada en la distancia *lookahead*¹.

En los escenarios de seguimiento de camino donde solo son tomadas en cuenta las restricciones espaciales, el objetivo es hacer que el vehículo se dirija en dirección al camino. Con las leyes planteadas anteriormente se puede lograr dicho propósito. La segunda ley requiere menos recursos computacionales para realizar los cálculos y además puede aplicarse para cualquier valor de error de seguimiento perpendicular al camino.

La ley de dirección basada en la distancia *lookahead* incluye la selección del parámetro Δ (distancia *lookahead*). Su selección depende de la longitud del vehículo y además puede considerarse de manera constante o variable. Existen diversas investigaciones referidas al uso de *LOS* como estrategias de control en el guiado de vehículos marinos. Un ejemplo es lo propuesto por Velasco y otros autores (Velasco, 2008), quienes a partir de la estrategia de guiado *LOS* ajustan un controlador de rumbo tipo *PI-D* que debe seguir una dirección específica. Miao (Miao, 2017) presenta una estrategia de línea de visión compuesta (*CLOS*), con el uso de un control por retardo de tiempo, adecuado para caminos con grandes curvas. También se destaca el trabajo de Tao Liu junto a varios autores (Liu, 2017) donde proponen un control de seguimiento de camino basado en una modificación del algoritmo *LOS*. En estos trabajos no se toma en cuenta las afectaciones que provocan las perturbaciones marinas sobre el desempeño de los sistemas de control de movimiento. La estrategia *LOS* por sí sola no es capaz de corregir los errores que produce este tipo de perturbación.

1.5. Controlador I-LOS

Las fuerzas y perturbaciones ambientales tales como corrientes oceánicas, viento y olas afectan a los buques. En esta investigación se propone trabajar con los efectos adversos que provocan el viento y las corrientes marinas sobre el guiado de un *USV*. En todas las maniobras el viento es uno de los principales factores a considerar, debido a que con mayor o menor intensidad influye prácticamente siempre sobre el vehículo. Si el viento es fuerte, influye marcadamente en la acción del timón y las hélices durante la trayectoria.

Las corrientes marinas son movimientos o desplazamientos de agua en una dirección y con una intensidad dada dentro de los océanos y mares. El efecto de la acción de las corrientes, cuando es uniforme, tenderá a trasladar al buque en su conjunto en el mismo sentido y velocidad con que fluyen aquellas (Caharija, 2014).

¹Distancia que existe entre la proyección de la posición del vehículo sobre el camino y el punto del camino al cual se dirige la embarcación

Dentro de los requisitos iniciales a tener en cuenta para el movimiento del *Krick Felix*, se encuentra definir un camino en línea recta a partir de puntos, siendo de interés que el vehículo converja a dicho camino. Se plantea como solución a este requisito la utilización de la ley de dirección basada en la distancia *lookahead*, la misma está enfocada en determinar la dirección que debe seguir el vehículo.

El principal inconveniente que posee esta solución está en el marcado efecto que provocan las perturbaciones incidentes sobre el vehículo, dígame las corrientes marinas y el viento. La aparición de estas perturbaciones en el vehículo se expresa matemáticamente a través de los ángulos de deslizamiento (β_r y β_w) en el *USV*, sumado a la velocidad relativa correspondiente a ambas perturbaciones, induciendo modificaciones en el rumbo del vehículo.

En diversos trabajos se ha recurrido a técnicas de control que aseguren la robustez necesaria para lograr el seguimiento de caminos sin restricciones temporales en presencia de las corrientes (Zhou, 2013). Peymani demuestra que utilizando una técnica de *path following* basada en mínimos cuadrados se consigue ese propósito, pero para el caso de vehículos sobre-actuados (Peymani, 2013). Otros autores son partidarios de controlar directamente la velocidad relativa del vehículo. Para ello se pueden utilizar sensores tales como: *Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)* y pitómetros (Moe, 2014). En todos los casos se trata de dispositivos caros.

De acuerdo con la teoría del control, para eliminar los efectos que provocan las perturbaciones se necesita un controlador con acción integral. En tal sentido, una idea lógica consiste en ampliar la ley de guiado *LOS*, añadiéndole una acción integral (Valeriano-Medina, 2017). La acción integral logra contrarrestar la desviación causada por las perturbaciones marinas, pero a su vez puede provocar el efecto *wind-up*² que debe ser tratado a tiempo para que no implique graves consecuencias. Esta estrategia de guiado se conoce en la literatura como controlador *I-LOS*, y en los últimos tiempos se reporta con frecuencia su utilización en distintos tipos de vehículos marinos.

Como el *Krick Felix* no dispone de sensores de altas prestaciones, este último método es de suma importancia para disminuir la influencia de las perturbaciones sobre la embarcación.

²Este efecto es característico de los controladores que presentan acción integral, suele producirse cuando en un sistema de control con un amplio rango de operación, la variable de control alcanza los límites prefijados del actuador; cuando esto sucede, la salida del lazo de control permanece en su límite independientemente de la salida del proceso.

Existen múltiples investigaciones alrededor del mundo que se han realizado en función de esta temática. Algunos de los ejemplos de la utilización del controlador *I-LOS* se presenta a continuación:

Breivik ([Breivik, 2008](#)), parte de la idea de utilizar un controlador con acción integral (*I-LOS*), como parte de la ley de guiado, realizando el ajuste del mismo a partir de la distancia *lookahead*. Esta distancia se establece como un valor proporcional a la longitud del vehículo. La estabilidad de esta propuesta depende del valor de distancia que se seleccione. Esta solución no se encuentra restringida por condición alguna.

Even Børhaug ([Borhaug, 2008](#)) desarrolla una modificación a la estrategia *LOS* que depende de parámetros como la distancia *lookahead*. Usando un controlador *I-LOS* y un par de controladores adaptativos, para el seguimiento de camino en un *USV* en presencia de corrientes marinas constantes.

En el trabajo de Lekkas ([Lekkas, 2014](#)) se propone el uso de *I-LOS*, donde no se dispone de la medición de la velocidad, por lo que las corrientes se consideran como una perturbación desconocida. Esta investigación incluye un análisis de estabilidad mediante los métodos de Lyapunov y evalúa el desempeño del controlador mediante simulaciones.

Por su parte Caharija ([Caharija, 2014](#)) realiza un diseño basado en la utilización de un controlador *I-LOS* para un *AUV* cuando se desea disminuir el error de seguimiento provocado por las corrientes marinas, incluye un análisis de estabilidad mediante los métodos de Lyapunov y evalúa el desempeño del controlador mediante simulaciones y pruebas experimentales. También diseña un controlador *I-LOS* a partir de un modelo cinemático del plano *xy* para un vehículo de superficie donde incluye la influencia de las corrientes marinas, el viento y el oleaje como perturbaciones.

A través del prototipo de vehículo autónomo subacuático de nombre *HRC-AUV*, el *GARP* ha trabajado en el tema de guiado de vehículos marinos con el objetivo de lograr un seguimiento preciso de caminos formados por puntos. En ese sentido se han evaluado varios algoritmos, todos basados en la estrategia *LOS* y concebidos para maniobras en el plano horizontal.

Se han realizados varias publicaciones para apoyar esta investigación, tal es el caso de ([Valeriano-Medina, 2015](#)), donde se corrobora mediante simulación el desempeño de un controlador *I-LOS* en el vehículo *HRC-AUV*. Este mismo autor en su tesis doctoral ([Valeriano-Medina, 2017](#)) propone un esquema de guiado más complejo para dicho vehículo, donde utiliza un controlador *I-LOS* en cascada con un controlador de dirección deslizante. En ambos trabajos quedó demostrado que la utilización de una estrategia de guiado basada en un controlador *I-LOS* permite el seguimiento de caminos en línea

recta. Con la introducción de una acción integral en la ley de guiado se logró reducir el error de seguimiento que provocan las corrientes marinas. El desempeño del controlador *I-LOS* se evalúa mediante simulación y estadísticamente. El cálculo de las ganancias del controlador depende en lo fundamental de la selección del valor de la distancia *lookahead*, la cual se considera constante y dependiente de la longitud del vehículo.

1.6. Consideraciones finales

A pesar de la evolución y desarrollo que han experimentado los vehículos marinos, su estudio implica enfrentarse a disímiles desafíos relacionados con el campo de la automática. Los tópicos relacionados con el sistema de guiado de estos vehículos gozan de gran actualidad, quedando demostrado en la constante y elevada producción de publicaciones científicas.

El desempeño de los algoritmos de guiado de vehículos autónomos se ven afectados por perturbaciones medioambientales, tales como el viento y las corrientes marinas, así como por características no lineales propias de la dinámica del sistema. La estrategia de guiado *LOS* basada en el algoritmo *lookahead* se utiliza ampliamente para el seguimiento de caminos rectos por parte de vehículos marinos, pero no es suficiente para contrarrestar estas afectaciones.

Es por ello que en esta tesis se propone un esquema de guiado basado en un controlador *I-LOS*, para garantizar precisión durante el seguimiento de caminos rectos por parte del vehículo *Krick Felix*, en presencia de corrientes marinas y viento.

CAPÍTULO 2

MODELADO MATEMÁTICO DEL VEHÍCULO Y LAS PERTURBACIONES MARINAS

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático no lineal de 3 GDL que describe la dinámica del vehículo *Krick Felix*, así como una representación lineal de su subsistema lateral y los modelos para las corrientes marinas y el viento. En tal sentido, se detallan las variables y nomenclaturas a utilizar. Para la realización de las simulaciones se utiliza el modelo no lineal de 3 GDL calculado para el *Krick Felix*, presentando las matrices y vectores que forman parte del modelo y que han sido obtenidas en investigaciones anteriores (Balanza, 2017).

2.2. Modelo dinámico no lineal

Los movimientos de traslación y posición de un vehículo marino tradicionalmente se representan utilizando varias expresiones, lo que trae como resultado complicados modelos formados por cientos de elementos. El profesor Thor I. Fossen propone emplear una representación en forma vectorial de dichas expresiones para obtener una estructura compacta que permite representar los movimientos de una embarcación en los 6 GDL (Fossen, 1994, 2002). En la Tabla 2–1 se expone la nomenclatura estándar empleada en la descripción del movimiento de los vehículos marinos (SNAME, 1950), donde la guiñada es el grado de libertad más importante en el diseño de controladores de dirección.

Tabla 2–1: Notación utilizada para vehículos marinos.

Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
Avance	X	u	x
Desplazamiento lateral	Y	v	y
Arfada	Z	w	z
Rotación	Momento	Velocidad angular	Ángulo
Balanceo	K	p	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

El movimiento de un vehículo marino puede ser descrito a través de dos sistemas de coordenadas (Figura 2-1). Uno respecto al vehículo y otro inercial y referido a tierra. El primero de ellos es un sistema de coordenadas móvil llamado Sistema del Barco. El origen de este sistema (O_b) se sitúa en el centro de gravedad del vehículo (CG). Los ejes x_0 , y_0 y z_0 coinciden con los ejes principales de inercia.

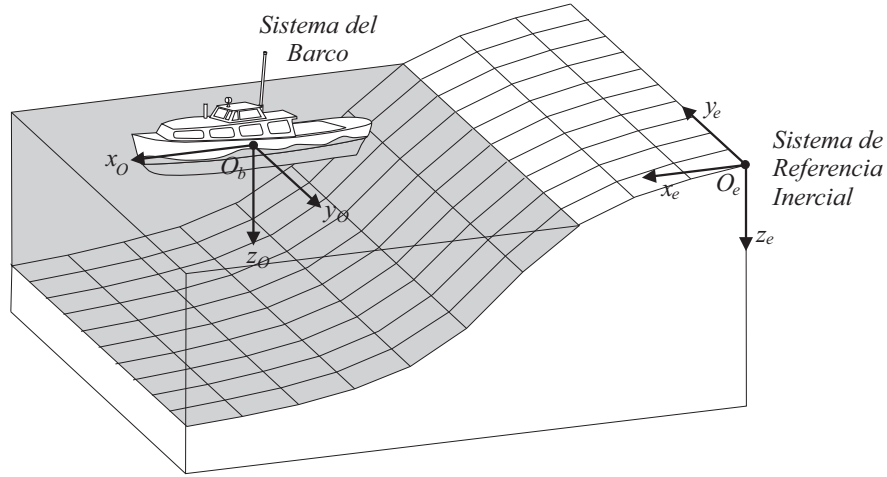


Figura 2-1: Sistemas de Coordenadas.

Para vehículos de superficie se trabaja solamente en el plano horizontal utilizando un modelo de 3 GDL. De esta manera como los barcos flotan ($z \approx 0$) y son longitudinal y lateralmente metacéntricos ($\phi = \theta = \dot{\phi} = \dot{\theta} \approx 0$), se descartan las dinámicas de arfada, balanceo y cabeceo. El movimiento general en los 3 GDL para estos vehículos se describe mediante (SNAME, 1950):

$$\boldsymbol{\nu} = [u, v, r]^T \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T \quad (2.2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [X, Y, N]^T \quad (2.3)$$

En este caso $\boldsymbol{\nu}$ representa al vector de velocidad lineal y angular con coordenadas en el sistema del vehículo, $\boldsymbol{\eta}$ denota el vector de posición y orientación con coordenadas en el sistema de referencia fijo en tierra y $\boldsymbol{\tau}$ se utiliza para representar las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo en el sistema de coordenadas del mismo.

Las ecuaciones cinemáticas son aquellas expresiones que relacionan la derivada de la posición y la velocidad de un cuerpo rígido. Dichas ecuaciones se pueden expresar en

forma matricial utilizando las transformaciones de ángulos de *Euler* como (Fossen, 2006):

$$\dot{\eta} = \mathbf{R}(\psi)\nu \quad (2.4)$$

donde $\mathbf{R}(\psi)$ es la matriz de transformación del Sistema del Barco al Sistema de Referencia Inercial, y queda definida como:

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

El modelo general de un vehículo marino se encuentra influenciado por las fuerzas y momentos hidrostáticos e hidrodinámicos; efectos que se expresan matemáticamente mediante los denominados términos de masas añadidas, de amortiguamiento y las fuerzas restauradoras. Teniendo esto en consideración la ecuación no lineal que describe el movimiento de un *USV* se expresa como (Fossen, 1994, 2002, 2011):

$$\underbrace{\mathbf{M}_{RB}\dot{\nu} + \mathbf{C}_{RB}(\nu)\nu}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{\mathbf{M}_A\dot{\nu} + \mathbf{C}_A(\nu)\nu + \mathbf{D}(\nu)\nu}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{\mathbf{g}(\eta)}_{\text{términos hidrostáticos}} = \tau \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 se puede expresar de manera compacta como:

$$\mathbf{M}\dot{\nu} + \mathbf{C}(\nu)\nu + \mathbf{D}(\nu)\nu + \mathbf{g}(\eta) = \tau \quad (2.7)$$

En esta ecuación:

- $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ es la matriz de inercia incluyendo las masas añadidas.
- $\mathbf{C}(\nu) = \mathbf{C}_{RB}(\nu) + \mathbf{C}_A(\nu)$ es la matriz que incluye los términos de *Coriolis* del cuerpo rígido y de las masas añadidas.
- $\mathbf{D}(\nu)$ es la matriz de amortiguamiento.
- $\mathbf{g}(\eta)$ es el vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad.
- $\tau = [\tau_X, \tau_Y, \tau_N]^T$ representa el vector de fuerzas y momentos de las entradas de control.

En el caso de vehículos que navegan en la superficie el vector $\mathbf{g}(\eta)$ se considera cero. La estructura de cada una de estas matrices y vectores para el vehículo *Krick Felix* han sido determinadas por *GARP* en investigaciones anteriores (Balanza, 2017).

2.2.1. Dinámica del cuerpo rígido

Las matrices $\mathbf{M}_{RB}$ y $\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})$ están formadas por coeficientes que pueden ser determinados a partir de las propiedades de gravedad e inercia del vehículo. Estas se determinan de la forma:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mX_g \\ 0 & mX_g & I_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mX_g r \\ mr & 0 & 0 \\ mX_g r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde m es la masa de la embarcación, X_g es la distancia en el eje x_0 entre el CG y el origen del Sistema del Barco e I_z es el momento de inercia.

2.2.2. Términos de masas añadidas

Los términos de masas añadidas se definen como las fuerzas y momentos inducidos, debido al movimiento armónico del vehículo. Las masas añadidas son proporcionales a la aceleración del vehículo. Consecuentemente, las masas añadidas y la aceleración están desfasadas 180 grados con respecto al movimiento armónico de la embarcación (Fossen, 2002).

En los *USV*, es común desacoplar el movimiento de avance de la dinámica de guiñada debido a la simetría del plano x - y . Además se hace notar que para velocidades relativas iguales a cero, la matriz de masas añadidas $\mathbf{M}_A$ es constante. La matriz de masas añadidas $\mathbf{M}_A$ y la matriz hidrodinámica de coeficientes Coriolis $\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu})$ para embarcaciones que se muevan con velocidad positiva mayor que cero se representan de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}\nu \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ Y_{\dot{v}}\nu & -X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.2.3. Amortiguamiento hidrodinámico

El amortiguamiento hidrodinámico para vehículos marinos es causado principalmente por los coeficientes de radiación inducidos debido a las oscilaciones del cuerpo, la fricción lineal y cuadrática causada por la presencia de flujos tipo laminar y turbulento, el amortiguamiento de las olas y el debido a la existencia de torbellinos (Fossen, 2011).

Para embarcaciones marinas el amortiguamiento lineal siempre estará presente debido a la fricción lineal. Los elementos que conforman la estructura de esta matriz pueden ser determinados a partir de experimentos (Fossen, 1994). La matriz $D(v)$ se determina como:

$$D(v) = -diag\{X_u + X_{|u|u}|u|, Y_v, N_r\} \quad (2.12)$$

2.2.4. Modelo de los Actuadores

En el guiado de embarcaciones marinas es necesario distribuir las fuerzas generalizadas de control τ de los actuadores en términos de las entradas de control u (Fossen, 2011). En la Tabla 2-2 se muestran los actuadores con que cuenta el *Krick Felix* y sus variables de control correspondientes.

Tabla 2-2: Actuadores y entradas de control del *Krick Felix* (Balanza, 2017).

Actuadores	u	f^T	m^T	r^T
Hélice	$ n n$	$[\tau_X, 0, 0]$	$[\tau_K, 0, 0]$	$r_H = [l_{xH}, l_{yH}, l_{zH}]^T$
Timón de cola	Ángulo de deflexión (δ_T)	$[0, \tau_Y, 0]$	$[0, \tau_M, 0]$	$r_T = [l_{xT}, l_{yT}, l_{zT}]^T$

Donde: u se refiere a las entradas de control, f^T y m^T son los términos de fuerzas y momentos respectivamente, r^T representa las distancias a las que se encuentran ubicados los actuadores respecto al origen del Sistema del Barco.

Las fuerzas y momentos que provocan las entradas de control sobre los 3 GDL del *Krick Felix* pueden determinarse como:

$$\tau = TKu \quad (2.13)$$

En la cual T representa a la matriz de configuración de los actuadores. Dicha matriz define la relación existente entre la fuerza que ejerce cada actuador y la posición en la que está ubicado. Mientras que K representa los coeficientes de fuerzas de control producidos por la hélice y el timón de cola y u es la entrada de control dependiente del actuador que se considere.

La ecuación 2.13 se puede representar de la forma:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{|n|n}|n|n \\ k_2\delta_T \\ k_2l_{xT}\delta_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.3. Modelo lineal para el subsistema lateral

Para que un vehículo de superficie realice diversas maniobras en entornos donde las perturbaciones marinas son afectaciones constantes, resulta poco práctico el uso de un modelo detallado de la embarcación. Por tal motivo la ecuación 2.7 no resulta útil para el diseño de controladores convencionales y desacoplados en un *USV*. Para ello una alternativa consiste en dividir el sistema en subsistemas entre los cuales exista poca interacción. El objetivo de esta opción es alcanzar mayor rapidez en las simulaciones que en las maniobras de tiempo real, lo cual es especialmente importante para propósitos de predicción dinámica (Fossen, 2002; Sutulo, 2002). Esta descomposición es posible llevarla a cabo debido a las propiedades geométricas y al alto grado de simetría con que cuenta el *Krick Felix*.

Los dos subsistemas en los que se divide el modelo de 3 GDL del *Krick Felix* y sus variables de estado son:

- Subsistema lateral: es utilizado para las maniobras de dirección del vehículo. Variables de estado: v , r y ψ .
- Subsistema de velocidad: es utilizado para el diseño del controlador de velocidad. Variable de estado: u .

De las expresiones desacopladas que describen el movimiento de avance, desplazamiento lateral y guiñada de la embarcación se pueden obtener las siguientes ecuaciones lineales del movimiento (Chavez, 2005):

$$\text{Velocidad : } X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2) \quad (2.15)$$

$$\text{Desplazamiento lateral : } Y = m(\dot{v} - ur + X_G \dot{r}) \quad (2.16)$$

$$\text{Guiñada : } N = I_z \dot{r} + mX_G(ur + \dot{v}) \quad (2.17)$$

La ecuación 2.15 (movimiento longitudinal) se puede desacoplar de las otras dos (movimiento transversal y guiñada), suponiendo que la velocidad del barco u y el empuje se mantienen constante.

En esta investigación el subsistema lateral es el de mayor interés, puesto que es el utilizado para el diseño del controlador de rumbo, el cual recibe las referencias provenientes del sistema de guiado. Como el origen del sistema de coordenadas del barco *Krick Felix* se encuentra ubicado en el centro de gravedad, el término X_G es igual a cero. Teniendo en cuenta estos elementos, la dinámica del vehículo para el subsistema lateral se puede describir a partir de las siguientes expresiones:

$$Y = m(\dot{v} - u_0 r) \quad (2.18)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (2.19)$$

La relación de transformación cinemática correspondiente al término ψ teniendo en cuenta las condiciones de operación del vehículo, está definida por:

$$\dot{\psi} = \frac{s\theta_0}{c\theta_0} q + \frac{c\phi_0}{c\theta_0} r \approx r \quad (2.20)$$

Las expresiones correspondientes a Y y N para este subsistema son:

$$Y = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_v v + Y_{\delta} \delta_T \quad (2.21)$$

$$N = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r + N_{\delta} \delta_T \quad (2.22)$$

El modelo lineal en espacio-estado que representa la dinámica del subsistema lateral está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} & \frac{mu_0}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_3}{I_z - N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.23)$$

donde $Y_{\dot{v}}$ y $N_{\dot{r}}$ son la fuerza y el momento provocados por las masas añadidas, Y_v y N_r poseen valores negativos ya que son la fuerza y el momento de amortiguamiento, b_2 y b_3 son ganancias a partir de las cuales se generan la fuerza y el momento provocados por el timón.

El modelo de *Nomoto* de segundo orden es una alternativa muy utilizada por los diseñadores de los sistemas de control para obtener modelos de orden reducido basados en el subsistema lateral (Moreno, 2015; Fossen, 2011). A partir de este modelo es posible

obtener la función de transferencia entre el ángulo de guiñada y el ángulo de deflexión del timón horizontal como:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{b_3}{(I_z - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s} \quad (2.24)$$

2.4. Modelado de las perturbaciones marinas

Las corrientes marinas, son movimientos superficiales de las aguas de los océanos, producidas por la gravedad, la fricción del viento y la variación de la densidad del agua. Las corrientes marinas constituyen una de las principales perturbaciones que afectan a los vehículos marinos de superficie durante la navegación. Otro tipo de perturbaciones alrededor de un robot marítimo en operación son las fuerzas del viento. Se consideran en este caso como perturbaciones externas y actuantes en cada uno de los ejes del sistema de coordenadas del vehículo (x_0, y_0, z_0) . Para ello, con el objetivo de alcanzar una mayor precisión en el modelo del *Krick Felix*, a la ecuación 2.7 se le incorporan los términos relativos a las corrientes marinas y el viento quedando como sigue:

$$M\dot{\nu}_r + C(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r = \tau + \tau_W \quad (2.25)$$

2.4.1. Modelado de las corrientes marinas

El efecto de las corrientes marinas se tiene en cuenta con la sustitución en el modelo de 3 GDL de la velocidad del vehículo por (ν_r) . Este término representa la velocidad relativa del vehículo con respecto a las corrientes y queda definido como:

$$\nu_r = \nu - V_c \quad (2.26)$$

Donde ν es el vector velocidad del vehículo definido en la ecuación 2.1 y el vector que representa la velocidad de las corrientes referido al origen del sistema del vehículo es $V_c = [u_c, v_c, 0]^T$, considerando que las mismas no generan movimientos rotacionales en el vehículo. Las componentes u_c y v_c , referidas al sistema inercial, pueden ser calculadas a partir del módulo de la velocidad de las corrientes (V_{ca}) y el ángulo de dirección que poseen (β_c):

$$u_c^E = V_{ca} \cos \beta_c \quad v_c^E = V_{ca} \sin \beta_c \quad (2.27)$$

Para obtener las componentes referidas al Sistema del Barco, es necesario aplicar las transformaciones de coordenadas en función de los ángulos de Euler (Fossen, 2011), quedando de la forma:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \end{bmatrix}$$

Luego, aplicando identidades trigonométricas, es posible desarrollar las siguientes ecuaciones:

$$u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi) \quad (2.28)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi) \quad (2.29)$$

2.5. Modelado del viento

La incidencia del viento sobre el vehículo se ve determinado a partir del vector fuerzas. Según la Figura 2-2, se puede apreciar que en este modelo se tienen en cuenta tanto la velocidad del viento como el ángulo con el que incide sobre el barco. Matemáticamente, se expresa según la siguiente ecuación (Caharija, 2014):

$$\tau_W = \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ N_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho_w V_R^2 A_T C_X(\gamma_w) \\ \frac{1}{2}\rho_w V_R^2 A_L C_Y(\gamma_w) \\ \frac{1}{2}\rho_w V_R^2 L C_N(\gamma_w) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

donde:

- ρ_w representa la densidad del aire.
- A_T , A_L y L definen las áreas transversal y lateral proyectadas por encima de la superficie del agua, así como la longitud del vehículo.
- V_w y β_w representan la velocidad y la dirección del viento, definidas en la Figura 2-2.
- C_X , C_Y y C_N definen los coeficientes de torque y fuerzas aerodinámicas que son calculados en el Anexo A.
- V_R y γ_w representan el módulo y dirección de la velocidad del viento relativa al vehículo, definidas en la Figura 2-2.

Las expresiones para determinar los valores de γ_w y V_R son:

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (2.31)$$

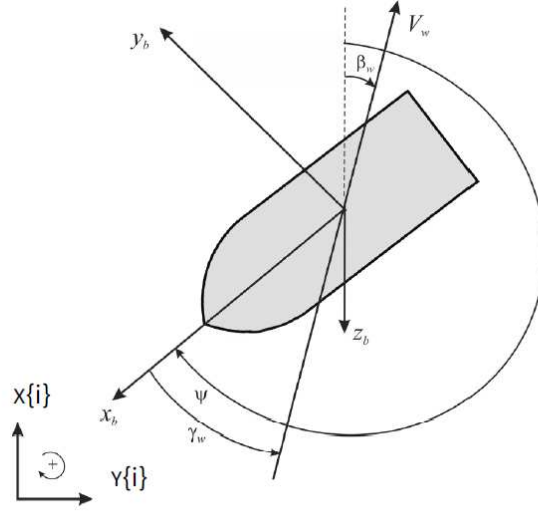


Figura 2–2: Definición de la velocidad del viento V_w , dirección del viento β_w y su ángulo de incidencia γ_w (Fossen, 2011).

$$V_R = \sqrt{u_{rW}^2 + v_{rW}^2} \quad (2.32)$$

Las componentes de la velocidad del viento relativa al vehículo en las direcciones x - y son:

$$\begin{aligned} u_{rW} &= V_w \cos(\beta_w - \psi) \\ v_{rW} &= V_w \sin(\beta_w - \psi) \end{aligned} \quad (2.33)$$

2.6. Valores del modelo no lineal de 3 GDL para el *Krick Felix*

A través de la ecuación 2.25 quedó expuesta la representación matemática del modelo dinámico no lineal de 3 GDL para un *USV*. En este epígrafe se presentan las matrices y vectores que conforman la ecuación 2.25, teniendo en cuenta los valores geométricos e inerciales del *Krick Felix* mostrados en la Tabla 1–1. La matriz de inercia $\mathbf{M}$, está determinada por:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0,8163 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0076 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0464 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

mientras que la matriz $\mathbf{C}(\nu)$, que incluye los términos de *Coriolis* y de masas añadidas, queda como:

$$\mathbf{C}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & -0,8r & 0,2076v \\ 0,8r & 0 & -0,0163u \\ 0,2076v & -0,0163u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Los valores numéricos de los parámetros que forman parte de la matriz de amortiguamiento $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ y del vector $\boldsymbol{\tau}$ son obtenidos mediante identificación experimental. Para ello se utilizan los datos recopilados en sencillos experimentos realizados en una piscina con el *Krick Felix* (Balanza, 2017). Resultando:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -diag\{2,2677 + 0,7304|u|, 0,0149, 0,2386\} \quad (2.36)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,566 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0,25 \\ 0 & 0,0569 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Los términos de la ecuación 2.7, referente al modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* han sido evaluados mediante simulación y pruebas experimentales (Balanza, 2017). Este modelo se utiliza en esta investigación ya que permite simular en el dominio del tiempo los movimientos del vehículo durante el seguimiento de caminos rectos.

Por otra parte, es de destacar que los valores que caracterizan el comportamiento de las corrientes marinas y el viento (V_c , β_c , V_w y β_w), serán oportunamente indicados ante cada simulación que se ejecute a lo largo del presente capítulo.

2.7. Comportamiento del modelo dinámico no lineal de 3 GDL

El modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* se utiliza para simular en el dominio del tiempo los movimientos del vehículo durante la ejecución de distintas maniobras. Este modelo constituye la representación dinámica más exacta que se ha obtenido del vehículo. En la Figura 2-3, se presenta el esquema de implementación del modelo, de acuerdo a la ecuación 2.25.

Las entradas del modelo son las velocidades del motor (rpm) y las deflexiones angulares que se producen en el timón. Por su parte, las salidas son los vectores de velocidad y posición del vehículo. Esta representación incluye los efectos que sobre el vehículo producen las corrientes marinas y el viento.

Para evaluar la robustez, el comportamiento y las limitaciones que puede tener el modelo se deben realizar un conjunto de maniobras (Fossen, 2002). A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la simulación de algunas maniobras utilizando el modelo no lineal de la embarcación. Si el modelo se simula manteniendo un ángulo de timón constante de 0.1 rad y una velocidad de giro constante en el motor de 600 rpm , la curva resultante deberá seguir un círculo. En la Figura 2-4 se presentan los resultados obtenidos en esta simulación, con lo cual se demuestra dicho comportamiento.

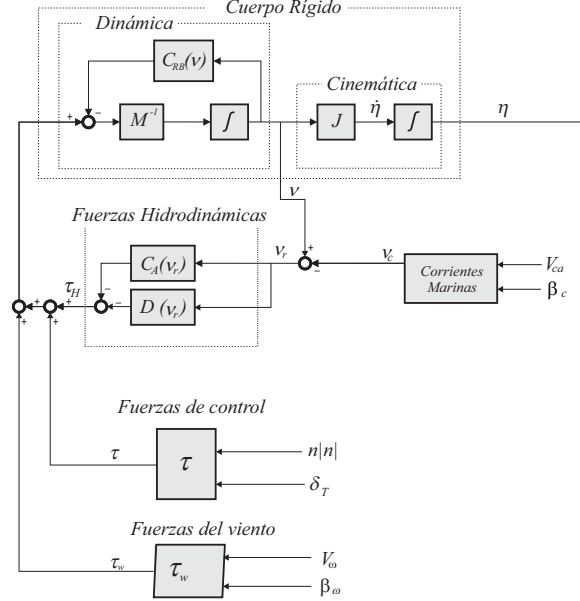
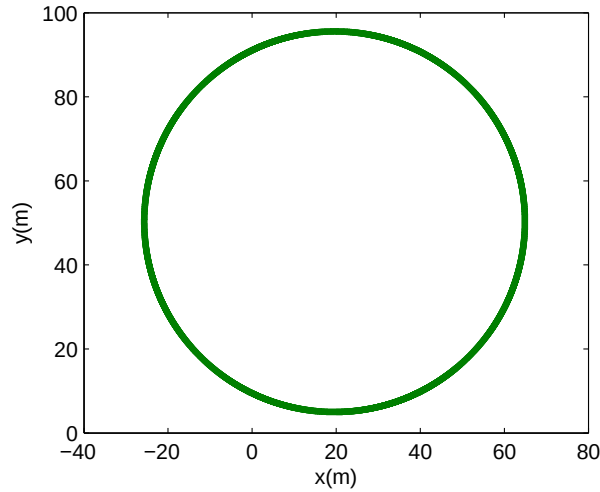

 Figura 2–3: Esquema general para el modelo dinámico no lineal de 3 GDL del *Krick Felix*.


Figura 2–4: Simulación del modelo no lineal de 3 GDL para una maniobra circular.

Como el vehículo se ve afectado por la influencia de las corrientes marinas y el viento se hace necesario evaluar el modelo del vehículo bajo la incidencia de estas perturbaciones. En la segunda maniobra realizada, se tiene en cuenta solamente la incidencia de las corrientes marinas con una velocidad $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ y un ángulo de deslizamiento $\beta_c = 10^\circ$. En una maniobra circular, la forma de la trayectoria depende del ángulo de incidencia y de la velocidad con que las perturbaciones afecten al vehículo. Como se muestra en la Figura 2–5, las corrientes marinas provocan una desviación en la trayectoria descrita por el vehículo.

Para simular los efectos provocados por el viento, se le incorpora al modelo los valores de velocidad y ángulo de deslizamiento del mismo ($V_w = 0,7 \text{ m/s}$ y $\beta_w = 10^\circ$). Como se

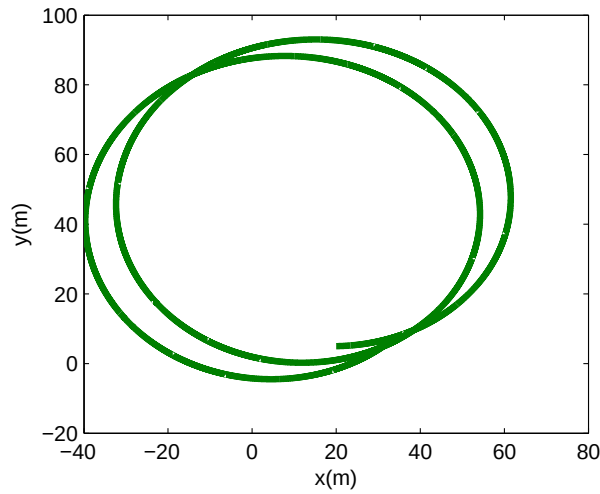


Figura 2-5: Simulación de maniobra circular con corrientes marinas.

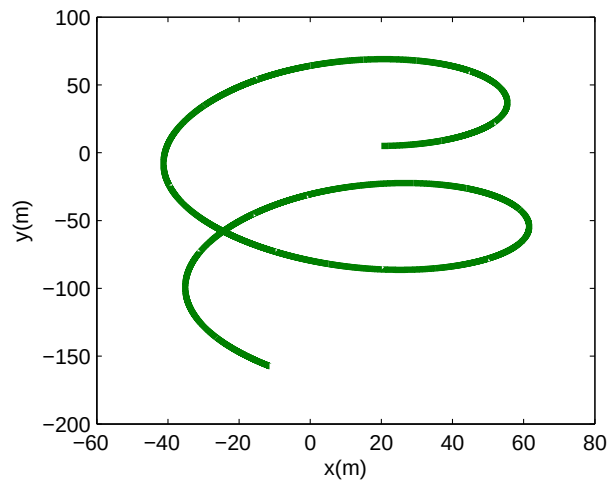


Figura 2-6: Simulación de maniobra circular con corrientes marinas y viento.

aprecia en la Figura 2-6, la desviación de la trayectoria es mayor con la incorporación del viento en el modelo de 3 GDL.

Los resultados de las simulaciones demuestran que, para condiciones medioambientales caracterizadas por la presencia de vientos y corrientes marinas, los resultados del modelo no lineal de 3 GDL son coherentes con el comportamiento que presentan los vehículos de este tipo durante el desarrollo de maniobras en el mar.

2.8. Consideraciones Finales

La incorporación de representaciones matemáticas del viento y las corrientes marinas en el modelo no lineal del vehículo, contribuye a garantizar similitud con respecto al entorno de operación. Estas perturbaciones provocan desviaciones que afectan el comportamiento del vehículo, lo cual queda evidenciado en las simulaciones realizadas.

El esquema de guiado basado en controlador *I-LOS* debe ser capaz de corregir estas afectaciones.

Los resultados obtenidos mediante simulación con el modelo demuestran que las ecuaciones resultantes describen el comportamiento del vehículo de manera suficientemente precisa, por lo que pueden ser utilizadas para la evaluación del desempeño del esquema de guiado que se propone en esta investigación.

CAPÍTULO 3

AJUSTE Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CONTROLADOR *I-LOS*

3.1. Introducción

En el presente capítulo se explica el algoritmo de guiado para el seguimiento de caminos rectos basado en la distancia *lookahead*. Se define también la estructura del controlador a utilizar en el sistema de guiado del *Krick Felix*. Posteriormente se ofrecen los resultados de la propuesta de solución para el objetivo principal de esta investigación. Se presenta el diseño de un sistema de guiado basado en un controlador *I-LOS* que asegura el seguimiento de caminos rectos y la reducción del error perpendicular al camino provocado por las corrientes marinas y el viento en el vehículo de superficie *Krick Felix*. También en el capítulo se exponen los resultados obtenidos mediante simulación del esquema de guiado y se termina realizando una valoración económica de la investigación.

3.2. Controlador de rumbo

El controlador de rumbo es el encargado de asegurar un adecuado desempeño del vehículo durante la ejecución de maniobras donde ocurren cambios en la dirección del mismo (Valeriano-Medina, 2015). Para el *Krick Felix*, ha sido implementado un controlador de rumbo del tipo *P-D*.

La ecuación 3.1 describe de manera simplificada la dinámica lateral del *Krick Felix*.

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,0437}{s(0,1945s + 1)} \quad (3.1)$$

A partir de esta función de transferencia se ajusta un controlador *P-D*, cuya señal de mando se presenta en la ecuación 3.2.

$$\delta_T = K_p(\psi_d - \psi) - K_d r \quad (3.2)$$

donde K_p y K_d representan los valores de ganancia proporcional y derivativa respectivamente. El valor de ψ_d es usado para denotar el ángulo de dirección deseado.

Los valores de ganancia del controlador son $K_p = 10$ y $K_d = 1$, y han sido determinados utilizando la técnica de ubicación de ceros y polos (Balanza, 2017). En la Figura 3-1 se muestran los resultados obtenidos mediante simulación con este controlador.

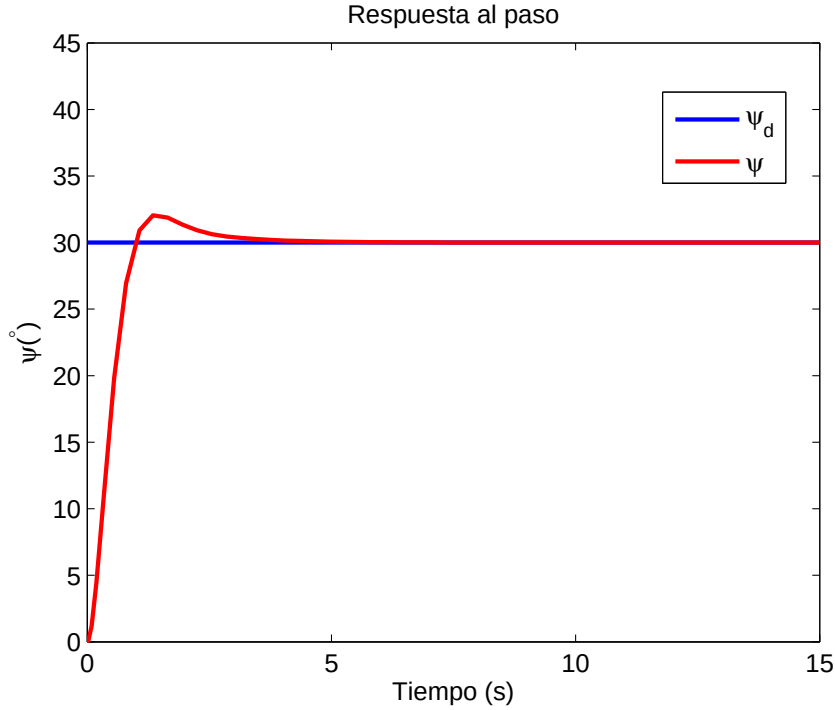


Figura 3-1: Respuesta del sistema de control de rumbo ante una entrada paso.

De esta manera se demuestra que el controlador de rumbo tipo $P-D$ logra seguir los valores de referencia. Por lo que puede emplearse para seguir las referencias determinadas por el algoritmo de guiado que a continuación se explica.

3.3. Algoritmo de guiado basado en la distancia *lookahead*

Durante la ejecución de maniobras de un vehículo marino ocurren cambios en la dirección del mismo. Sus coordenadas (x, y) varían con respecto al tiempo, provocando desviaciones en la ruta deseada. Para el trabajo con caminos en línea recta definidos esencialmente por dos puntos a través de los cuales el vehículo debe pasar, se pueden representar dichos puntos como $p_k = [x_k, y_k]^T \in \mathbb{R}^2$ y $p_{k+1} = [x_{k+1}, y_{k+1}]^T \in \mathbb{R}^2$, respectivamente. Si se considera p_k como origen del camino, cuyo eje x ha sido rotado un ángulo positivo $\alpha_k = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k)$ ¹ $\in \mathbb{S}$ relativo al eje x del sistema de referencia inercial del vehículo, las coordenadas cinemáticas del vehículo respecto al camino pueden ser calculadas de la forma:

¹Es una función del software Matlab que calcula la arcotangente de dos elementos como: $\text{atan2}(a,b)=\tan^{-1}(a/b)$

$$\xi(t) = R(\alpha_k)^T(p(t) - p_k) \quad (3.3)$$

siendo $R(\alpha_k)$ la matriz que permite rotar la posición del vehículo al sistema de referencia ubicado en el camino:

$$R(\alpha_k) = \begin{pmatrix} \cos\alpha_k & -\sin\alpha_k \\ \sin\alpha_k & \cos\alpha_k \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

y $\xi(t) = [x_e(t), y_e(t)]^T \in \mathbb{R}^2$, tal que $x_e(t)$ es el error de seguimiento a lo largo del camino y $y_e(t)$ el error de seguimiento perpendicular al camino, tal como se aprecia en la Figura 3-2.

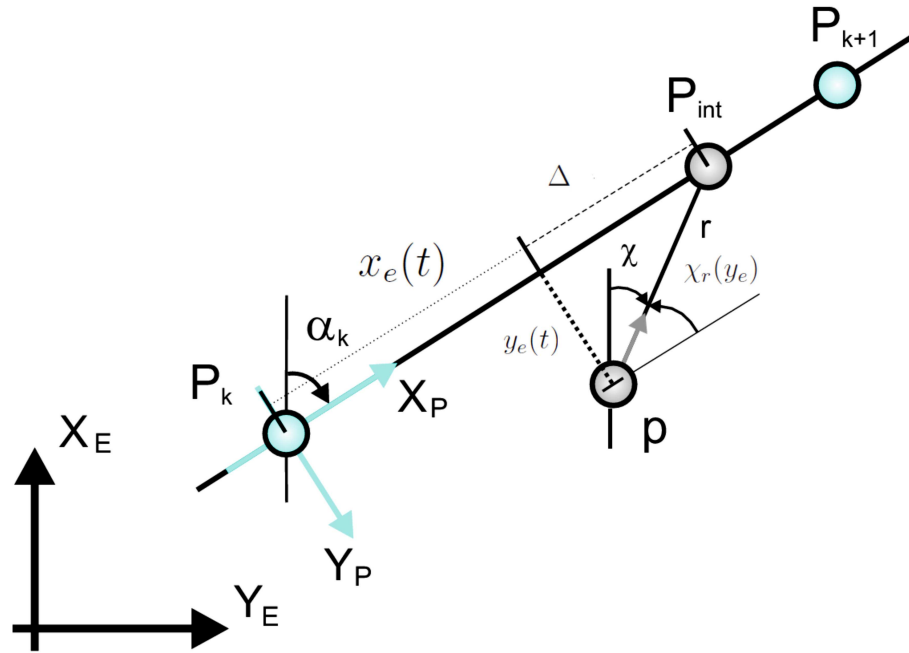


Figura 3-2: Principales variables del algoritmo de guiado basado en la distancia *look-ahead*.

Para el caso de seguimiento de caminos, donde interesan solo las restricciones espaciales, el objetivo de la ley de guiado se centra en la convergencia del vehículo al camino recto. Considerando las ecuaciones 3.3 y 3.4, las expresiones de los errores de seguimiento quedan planteadas como:

$$x_e(t) = (x_t - x_k)\cos\alpha_k + (y_t - y_k)\sin\alpha_k \quad (3.5)$$

$$y_e(t) = -(x_t - x_k)\text{sen}\alpha_k + (y_t - y_k)\text{cos}\alpha_k \quad (3.6)$$

La ley de dirección basada en la distancia *lookahead* se utiliza con el propósito de conducir al vehículo hacia el camino en dirección al vector *LOS* y simultáneamente lograr que $y_e(t)$ sea cero (Fossen, 2011; Caharija, 2014). Para ello el vector *LOS* se orienta desde la embarcación hasta el punto P_{int} , que está situado en una línea tangencial al camino, a una distancia *lookahead* (Δ) de la proyección de la posición del vehículo sobre el camino (Lekkas, 2014).

Esta ley propone determinar la dirección que debe seguir el vehículo a partir de la suma de dos ángulos:

$$\chi(y_e) = \chi_r(y_e) + \chi_p \quad (3.7)$$

donde:

$$\chi_p = \alpha_k \quad (3.8)$$

χ_p es el ángulo tangente al camino y $\chi_r(y_e)$ un ángulo de corrección, el cual asegura que la velocidad del vehículo esté en dirección al punto de ruta hacia el cual la embarcación se dirige.

$$\chi_r(y_e) = \arctan \frac{-y_e(t)}{\Delta} \quad (3.9)$$

En investigaciones realizadas anteriormente (Lekkas, 2014) se ha demostrado que asumir este parámetro variable o constante no produce diferencias significativas en el seguimiento de caminos rectos o de curvaturas leves. Por lo tanto se considera para este trabajo a Δ como un parámetro constante y su valor depende de la longitud del vehículo.

3.3.1. Criterio de punto vencido

Como el camino a seguir está conformado por n segmentos en línea recta conectados por $n+1$ puntos del camino, se debe emplear una estrategia para saber cuando un punto del camino ha sido vencido por el vehículo y de esta forma cambiar el objetivo de la misma hacia el siguiente punto del camino. Para ello Fossen (Fossen, 2002), propone una vía para hacerlo, la cual está asociada a un círculo de aceptación que se establece con cada punto del camino, cuyo radio será de valor $R_{k+1} > 0$ para el punto del camino $k+1$. De manera tal que el criterio para que el vehículo cambie de dirección hacia el siguiente punto queda definido por:

$$(x_{k+1} - x(t))^2 + (y_{k+1} - y(t))^2 \leq R_{k+1}^2 \quad (3.10)$$

Para cambiar de punto resulta necesario que la posición del vehículo esté dentro del círculo de aceptación, teniéndose que definir un valor de R_{k+1} .

3.4. Controlador $I - LOS$

Con el propósito de que el vehículo converja al camino con el menor error de seguimiento posible es necesario plantear el siguiente objetivo de control:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = 0 \quad (3.11)$$

De esta manera se consigue precisión en el cálculo del ángulo de rumbo deseado, permitiendo al vehículo vencer los puntos del camino. El seguimiento de caminos consiste en determinar un valor de ángulo de rumbo deseado, que le permita al vehículo ir venciendo los puntos del camino que sean definidos. Esto implica que:

$$\psi_d(y_e) = \chi(y_e) + \beta_r + \beta_{rw} \quad (3.12)$$

Los ángulos de deslizamiento provocados por las corrientes marinas y el viento (β_r y β_{rw}) se calculan como:

$$\beta_r = \arctan\left(\frac{v_r}{U_r}\right) \quad (3.13)$$

$$\beta_{rw} = \arctan\left(\frac{v_{rw}}{U_w}\right) \quad (3.14)$$

quedando en función de las velocidades relativas de las corrientes marinas y el viento, v_r y v_{rw} definidas en 2.26 y 2.33, donde U_r y U_w se calculan como:

$$U_r = \sqrt{(u_r^2 + v_r^2)} \quad (3.15)$$

$$U_w = \sqrt{(u_{rw}^2 + v_{rw}^2)} \quad (3.16)$$

Se pueden implementar dos métodos para lograr disminuir la influencia de las perturbaciones durante el seguimiento de una trayectoria:

- Compensación del ángulo de deslizamiento, a partir de la medición de la velocidad relativa del vehículo.
- Utilizar un controlador con acción integral, tomando los ángulos de deslizamiento lateral como una perturbación pequeña de poca variación, es decir $\beta_r \approx 0$ y $\beta_{rw} \approx 0$.

En esta investigación se utiliza el segundo método, considerándose entonces $\beta_r \approx 0$ y $\beta_{rw} \approx 0$, pues no se cuenta con las mediciones directas y fiables de la velocidad del vehículo. Por lo que las ecuaciones que permiten calcular el valor de rumbo deseado con los que el vehículo podrá ir venciendo los puntos del camino que sean definidos, queda modificada de la siguiente manera:

$$\psi_d(y_e) = \chi(y_e) \quad (3.17)$$

El valor de rumbo depende de $\chi(y_e)$, el cual se calcula a partir de la ecuación 3.7. Solo con la salvedad de que para este caso $\chi_r(y_e)$ es modificado con la inclusión de una acción integral dentro de la ley de dirección. Por lo que la estructura del controlador queda de la siguiente manera:

$$\chi_r(y_e) = -\arctan(k_p y_e(t) + k_i y_{int}) \quad (3.18)$$

donde $k_i = k_y k_p$, siendo $k_y > 0$ un parámetro de diseño y $\dot{y}_{int}$ queda definida como:

$$\dot{y}_{int} = \frac{y\Delta}{(\Delta)^2 + (y + k_y y_{int})^2} \quad (3.19)$$

y donde:

$$k_p = \frac{1}{\Delta} \quad (3.20)$$

En la Figura 3–3 se expone una representación geométrica del regulador *I-LOS* acorde a las ecuaciones 3.18 y 3.19.

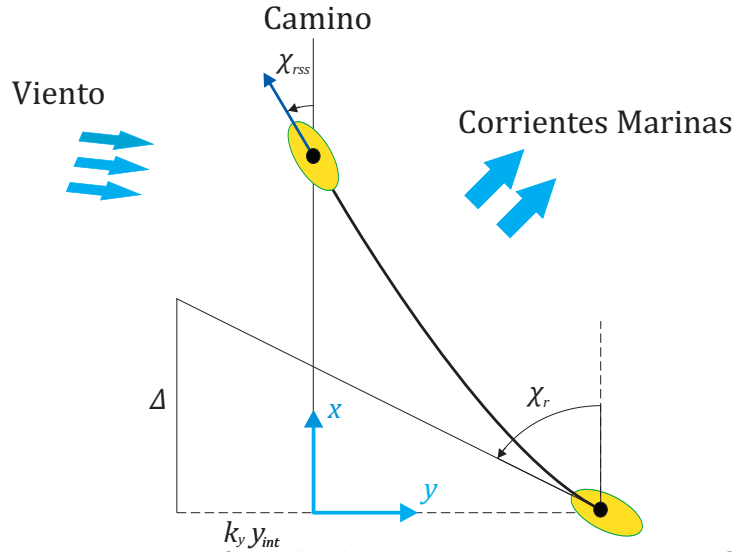


Figura 3–3: Modificación de la estrategia de guiado *LOS*.

Al incluir una acción integral en el algoritmo de guiado *LOS*, se logra reducir el error de seguimiento perpendicular al camino sin llegar a implementar la compensación del ángulo de deslizamiento. Integrar el error de seguimiento permite que el ángulo de

corrección no se anule cuando $e(t) = 0$. Cuando el vehículo se encuentre sobre la ruta deseada, el ángulo de corrección en estado estable (χ_{rss}) tendrá el valor necesario para evitar una nueva desviación (Borhaug, 2008). Esto es posible debido a que la velocidad longitudinal relativa de la embarcación se encarga de cancelar en gran medida el efecto provocado por las corrientes marinas y el viento (Caharija, 2014).

Para un vehículo sub-actuado como es el *Krick Felix* la acción integral puede ser de gran utilidad. Por tanto con el objetivo de eliminar el efecto *wind-up* y teniendo en cuenta que las mediciones de velocidad que se tienen en la práctica no son fiables, se selecciona el regulador *I-LOS* como parte del sistema de guiado del *Krick Felix*.

3.5. Ajuste del controlador I-LOS

De acuerdo con lo establecido en la ecuación 3.19, el ajuste del controlador *I-LOS* se basa en la selección de dos parámetros de diseño.

- Δ , se selecciona en un rango comprendido entre dos y seis veces la longitud del vehículo (Lekkas, 2014; Healey, 2006; Fossen, 2002).
- k debe ser mayor que cero.

Diferentes combinaciones de valores pueden ser utilizadas en el controlador a partir de estos parámetros. No existe ningún método de ajuste analítico para llegar a estos valores por lo que se hace necesario realizar varias simulaciones para encontrar estos valores. El parámetro k se selecciona igual a 0.5. Según se puede apreciar en las ecuaciones 3.20 y 3.18, pequeños cambios en los valores de la distancia Δ implica un cambio de forma brusca en el guiado, es por ello que se hace necesario buscar un valor de Δ adecuado para cada vehículo.

Para la realización de estas simulaciones se utiliza el camino que se define en la Tabla 3-1. Por su parte, las condiciones iniciales con las cuales el vehículo comienza el seguimiento del camino son: $[x_0, y_0]^T = [20, 5]^T$. Las simulaciones se realizan a 0,01 s de período de muestreo, considerando que el motor gira a 600 rpm, y fijando los valores de las perturbaciones marinas en: $V_c = 0,1 \text{ m/s}$, $\beta_c = 10^\circ$, $V_w = 0,2 \text{ m/s}$ y $\beta_w = 10^\circ$.

Tabla 3-1: Puntos del camino.

x (m)	10	90
y (m)	10	50

Con la información planteada anteriormente, se pretende analizar la conveniencia de seleccionar un valor específico de Δ a partir del comportamiento del error de seguimiento perpendicular al camino. En la Figura 3-4 se muestra el comportamiento de este error para valores de $\Delta = 1 \text{ m}$, 2 m y 3 m . Finalmente se selecciona $\Delta = 2 \text{ m}$, pues este

valor se encuentra entre el rango de 2 a 6 veces la longitud del vehículo y permite que el error perpendicular al camino se estabilice en cero de forma rápida y sin presentar oscilaciones.

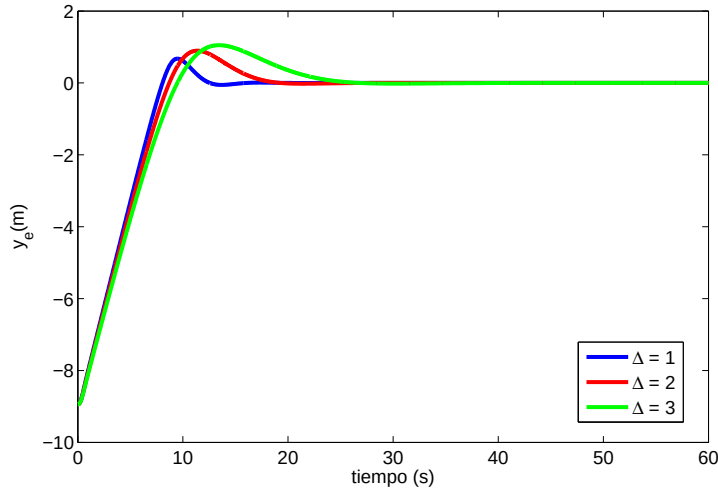


Figura 3–4: Error de seguimiento perpendicular al camino.

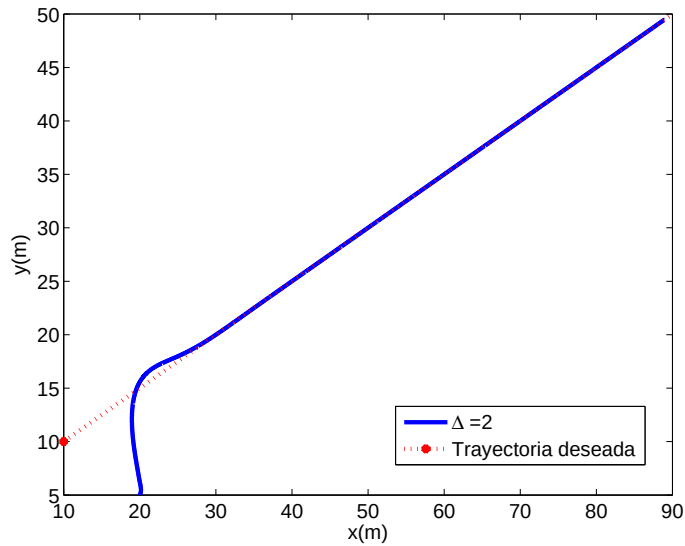


Figura 3–5: Seguimiento de camino para Δ igual a 2 m.

En la Figura 3–5 se muestra el resultado obtenido durante el seguimiento del camino propuesto para los valores encontrados durante el ajuste del controlador *I-LOS*. Se puede apreciar que la trayectoria de color azul, correspondiente al valor de $\Delta = 2$ m, permite la convergencia del vehículo al camino. Por lo que queda demostrado que el efecto integral de la estrategia de control *I-LOS* logra reducir las afectaciones que provocan las corrientes marinas y el viento durante la navegación del vehículo.

3.6. Evaluación del ajuste del controlador *I-LOS* durante el seguimiento de distintas trayectorias

En este epígrafe se propone evaluar el desempeño del controlador *I-LOS*, variando la trayectoria que debe seguir el vehículo. La evaluación del desempeño de este sistema de guiado se realiza en función del comportamiento de $y_e(t)$. En todos los casos se considera que el radio para el círculo de aceptación es de 1.2 m (dos veces la longitud del vehículo). Con este valor implementado en la ecuación 3.10 se establece cuando un punto de la trayectoria está vencido. Para la simulación realizada se mantienen los valores de los parámetros del modelo, las perturbaciones y del controlador *I-LOS* propuestos en el epígrafe 3.5, modificándose solamente el camino a seguir por el vehículo como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3–2: Puntos del camino.

x (m)	20	70	90	100
y (m)	10	40	90	40

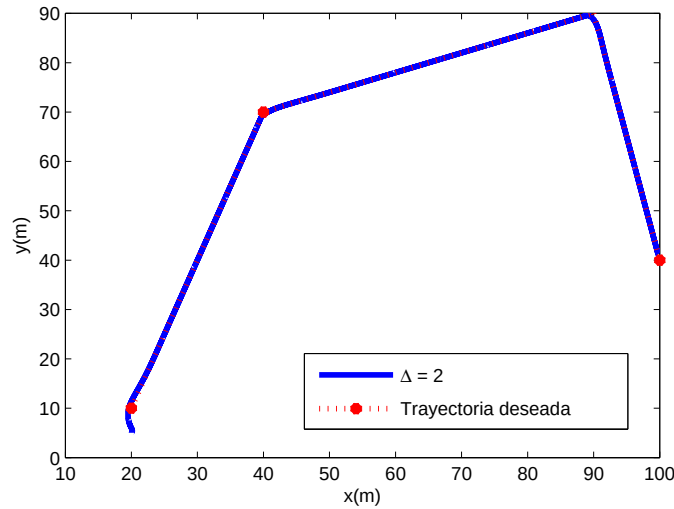


Figura 3–6: Seguimiento de camino.

En la Figura 3–6 se presentan los resultados obtenidos al graficar la trayectoria deseada y simular la seguida por el vehículo con el controlador *I-LOS*. Como se percibe, la utilización de un controlador *I-LOS* como parte del sistema de guiado, le permite al vehículo converger de forma rápida al camino, así como contrarrestar el efecto que provocan tanto las corrientes marinas como el viento durante el desarrollo de la misión. En la Figura 3–7 se evidencia como el error perpendicular al camino se hace cero en cada uno de los tramos.

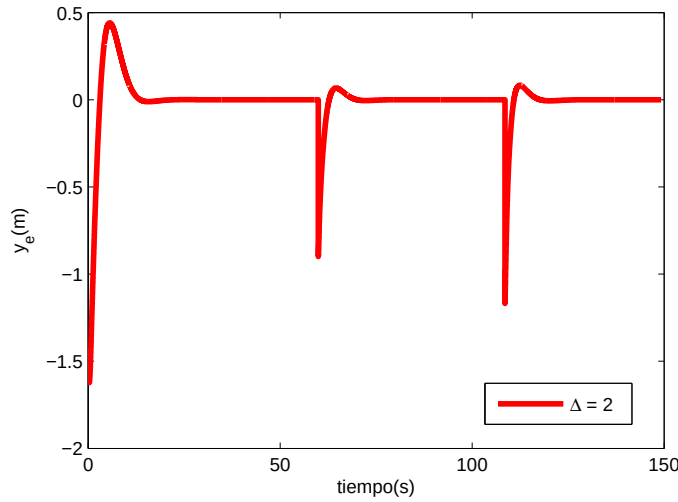


Figura 3–7: Error de seguimiento perpendicular al camino que se obtiene durante el seguimiento de la trayectoria.

3.7. Evaluación del ajuste del controlador *I-LOS* ante cambios en las velocidades de las perturbaciones

Para evaluar el desempeño del esquema de guiado propuesto se realiza una serie de pruebas de simulación con el vehículo, donde se modifica el grado de afectación de las perturbaciones sobre la embarcación. Para ello se realizan dos simulaciones que implica el seguimiento del camino definido en la Tabla 3–1, sin alterar el ajuste del controlador *I-LOS*. La primera simulación se realiza manteniendo la velocidad de las corrientes constante con valor de $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ y la velocidad del viento variable con valores de $V_w = 0,2 \text{ m/s}$, 1 m/s y 2 m/s . En la Figura 3–8 se muestran los resultados obtenidos para cada valor de velocidad del viento. Se aprecia como para los valores más elevados de la velocidad del viento, el error perpendicular al camino alcanza un mayor valor, pero la acción integral en todos los casos logra que se estabilice en cero.

Para la segunda prueba se modifican ambos valores de las perturbaciones, ahora $V_c = 0,1 \text{ m/s}$, $0,6 \text{ m/s}$ y $1,2 \text{ m/s}$ y $V_w = 0,2 \text{ m/s}$, $0,8 \text{ m/s}$ y $1,6 \text{ m/s}$. Como se presenta en la Figura 3–9, para los valores más elevados de las velocidades de las corrientes marinas y el viento, $y_e(t)$ incrementa su valor. La acción integral en todos los casos logra nuevamente que el error se estabilice en cero, aunque el comportamiento del error resulta más oscilatorio debido al incremento de la acción integral.

De esta manera se ratifica que mediante la inclusión de una acción integral dentro de la ley de guiado se asegura una disminución del error de seguimiento perpendicular al camino provocado por el efecto que provocan las corrientes marinas y el viento sobre el vehículo.

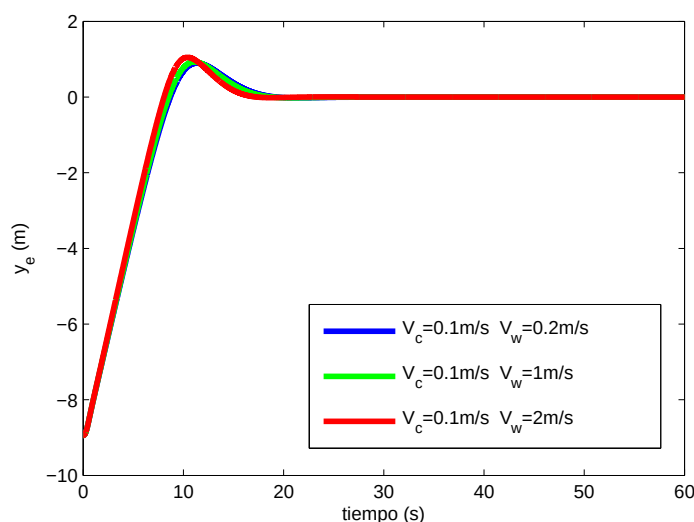


Figura 3–8: Error de seguimiento perpendicular al camino para diferentes valores de velocidad del viento.

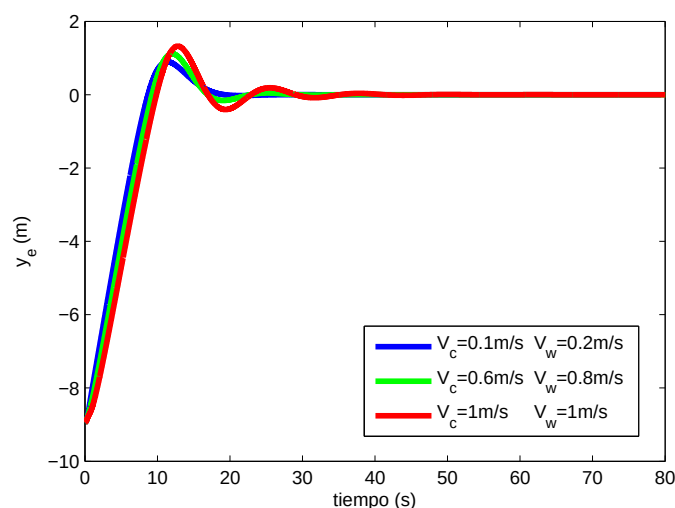


Figura 3–9: Error de seguimiento perpendicular al camino para diferentes valores de velocidad de las corrientes marinas y el viento.

3.8. Análisis económico

En el presente epígrafe se realiza el análisis económico-financiero-medioambiental del proyecto. Los componentes electrónicos que forman parte del equipamiento instalado en el vehículos son escogidos por el *GARP* a consideración de sus necesidades y de las prestaciones que poseen estos equipos, en estrecha relación con el presupuesto destinado para este tipo de investigaciones. Como se observa en la Tabla 3–3, los componentes electrónicos que conforman el equipamiento del vehículo son de bajo costo. Por lo que en comparación con la adquisición de un piloto automático para barcos, estimado en más de mil dólares, se considera viable la propuesta del *GARP* desde el punto de vista económico. El desarrollo de esta variante basada en equipamiento de bajo costo podría

contribuir al desarrollo tecnológico de un gran número de embarcaciones marinas en el país.

Tabla 3–3: Inversión realizada por el *GARP*.

Elementos	Precio
Krick Felix	105.20 USD
Pixhawk (Px4 Autopilot)	100 USD
Módulo GPS + Compass (Ublox M8N)	20 USD
Módulo de telemetría (3DR 433 MHz)	30 USD
Módulo de radio (DEVO RX701 2.4 GHz)	23 USD
Codificador PPM (PPM encoder V2 - Fishbonne)	17 USD
Motor DC de 7.4 Volts	5 USD
Servo motor digital (Robbe FS61bb de 4.8 - 6 Volts)	45 USD

Mediante la utilización del vehículo *Krick Felix* se pueden realizar investigaciones básicas de los recursos naturales renovables, el medio ambiente y los ecosistemas costeros y oceánicos, con énfasis en la investigación de aquellos sistemas con mayor diversidad y productividad como lagunas costeras, manglares, arrecifes rocosos y coralinos y zonas de surgencias. Desde un punto de vista social este proyecto permite evaluar los principales parámetros ecológico-pesqueros de las existencias de especies aprovechables, estudiar las poblaciones de otros recursos vivos marinos y la posibilidad de cultivar aquellos susceptibles de serlo, para así tener un mejor manejo y aprovechamiento de los recursos marinos.

3.9. Consideraciones finales del capítulo

El ajuste del controlador depende en gran medida del parámetro Δ el cual se considera constante y su selección depende de la longitud del vehículo. Para $\Delta = 2$ se consigue una convergencia suave y poco abrupta del vehículo al camino. La incorporación de una acción integral a la ley de dirección basada en la distancia *lookahead*, logra disminuir el error de seguimiento perpendicular al camino y asegura la convergencia del vehículo al camino, a pesar del efecto que provocan el viento y las corrientes marinas. Estos resultados quedan demostrados mediante simulación.

CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha logrado obtener un esquema de guiado que asegura precisión durante el seguimiento de caminos rectos en un vehículo de superficie sub-actuado afectado por fuerzas externas, lo cual queda demostrado mediante simulaciones. En cuanto a lo abordado con anterioridad se plantean las conclusiones generales del trabajo:

- Según los resultados encontrados del estudio realizado en la literatura especializada sobre las estrategias de control utilizadas en los sistemas de guiado de vehículos marinos, se plantea que una ley de guiado para el *Krick Felix*, que incluya un controlador *I-LOS* ajustado a partir de la geometría del camino y de las características del vehículo, permite contrarrestar el efecto que provocan las corrientes marinas y el viento durante el seguimiento de caminos rectos.
- Las corrientes marinas y el viento provocan desviaciones que afectan el comportamiento del vehículo, lo cual queda demostrado en las simulaciones realizadas con el modelo no lineal de 3 GDL.
- Con el ajuste obtenido para el controlador *I-LOS* se logra una convergencia suave y poco abrupta del vehículo al camino, lográndose que el error perpendicular al camino no presente oscilaciones y se estabilice en cero, tal como se muestra en las simulaciones.
- Las simulaciones realizadas demuestran que el esquema de guiado basado en un controlador *I-LOS* garantiza cero error de seguimiento perpendicular al camino en presencia de corrientes marinas y viento, por lo que constituye una solución de guiado factible para el vehículo *Krick Felix*.

Con las conclusiones presentadas se satisfacen los objetivos del trabajo y se justifica plenamente la necesidad de la investigación, quedando corroborada la hipótesis inicial establecida.

RECOMENDACIONES

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

- Implementar el controlador *I-LOS* en el software de bajo nivel para evaluar su desempeño durante el seguimiento de caminos rectos en pruebas experimentales con el *Krick Felix*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, A. P.; Dacic, D. B.; Hespanha J. P.; Kokotovic P. (2004). Path following or reference-tracking. an answer based on limits of performance. In: *5th IFAC/EURON Symposium. Intelligent Autonomous Vehicle*. IFAC. Lisboa, Portugal.
- Ahmad, S. M. (2015). Linear and nonlinear system identification techniques for modelling of a remotely operated underwater vehicle. *International Journal of Modelling, Identification and Control* **24**(1), 75–87.
- Allensworth, T. (1999). A short history of sperry marine. *Litton Marine Systems*, www.sperry-marine.com/pages/history.html.
- ArduPilot (2016). Mission planner overview. Página web: planner.ardupilot.com: (acceso marzo 2017).
- Balanza, C. (2017). Modelado dinámico del barco de pequeño porte Krick Felix. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Belleter, D.J.; Pettersen K. Y. (2015). Underactuated leader-follower synchronisation for multi-agent systems with rejection of unknown disturbances. In: *American Control Conference (ACC), 2015*. IEEE. Chicago, USA. pp. 3094–3100.
- Bennett, S. (1993). *A history of control engineering, 1930-1955*. number 47. IET.
- Bibuli, M.; Caccia, M.; Lapierre L.; Bruzzone G. (2012). Guidance of unmanned surface vehicles: Experiments in vehicle following. *IEEE Robotics & Automation Magazine* **19**(3), 92–102.
- Bibuli, M.; Caharija, W.; Pettersen K. Y.; Bruzzone G.; Caccia M.; Zereik E. (2014). UWS guidance-experiments and tuning. *IFAC Proceedings Volumes* **47**(3), 4209–4214.
- Blanke, M.; Knudsen, M. (2006). Efficient parameterization for grey-box model identification of complex physical systems. In: *14th IFAC Symposium on System Identification (SYSID06)*. IFAC. New Castle, Australia. pp. 338–343.
- Blendermann, W. (1994). Parameter identification of wind loads on ships. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **51**(3), 339–351.
- Borhaug, E.; Pavlov, A.; Pettersen K. Y. (2008). Integral control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents. In: *47th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE Xplore. Cancun, Mexico. pp. 4984 – 4991.

- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2007). Applying missile guidance concepts to motion of marine craft. In: *Control Applications in Marine Systems*. Vol. 7. IFAC. Croacia. pp. 349–354.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles, pp. 51–76. InTech. Vienna, Austria.
- Brodtkorb, A. H.; Nielsen, U. D.; Sorensen A. J. (2015). Sea state estimation using model-scale dp measurements. In: *OCEANS 2015 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. IEEE. Washington, Estados Unidos. pp. 1–7.
- Caccia, M.; Bibuli, M.; Bono R.; Bruzzone G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle.. *Auton. Robots* **25**(4), 349–365.
- Caccia, M.; Bono, R.; Bruzzone G.; Spirandelli E.; Veruggio G.; Stortini A.M.; Capodaglio G. (2005). Sampling sea surfaces with sesamo: an autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE Robot. Autom.* **12**(3), 95–105.
- Caharija, W. (2014). Integral Line-of-Sight Guidance and Control of Underactuated Marine Vehicles. Tesis doctoral.. NTNU. Noruega.
- Campbell, S.; Naeem, W.; Irwin G. W. (2012). A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control* **36**(2), 267–283.
- Chavez, J.; Picado, A.; Steller J. M. (2005). Aplicaciones de control en barcos. Monografía. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Cruz, J. M.; Aranda, J.; Girón J. M. (2012). Tutorial automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **9**(3), 205–218.
- Cruz, N.; Matos, A. (2008). The *mares auv*, a modular autonomous robot for environment sampling. In: *OCEANS 2008*. IEEE Xplore. Quebec, Canadá. pp. 1 – 6.
- da Silva, J. E.; Terra, B.; Martins R.; de Sousa J. B. (2007). Modeling and simulation of the lauv autonomous underwater vehicle. In: *13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. IFAC. Szczecin, Polonia. pp. 149–153.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I. (2002). *Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics. Noruega.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I.; Ross, A. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Nonlinear modelling, identification and control of UUVs, pp. 13–42. Vol. 69. Peter Peregrinus

LTD. Gran Bretaña.

- Haghighi-Fard, S. N.; Moghimi, M. (2015). Analysis of the effective parameters on hydrodynamic derivatives coefficients. *Cumhuriyet Science Journal* **36**(4), 1230–1243.
- Healey, A. J. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Guidance Laws, Obstacle Avoidance, Artificial Potential Functions, pp. 43–66. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD. Gran Bretaña.
- Hegrenæs, O.; Hallingstad, O.; Jølving B. (2007). Comparison of mathematical models for the hugin4500 auv based on experimental data. In: *THE IEEE International Symposium on Underwater Technology*. IEEE. Japón. pp. 558–567.
- Jun, S. W. ; Kim, D. W. ; Lee H. J. (2012). Design of t-s fuzzy-model-based diving control of autonomous underwater vehicles : Line of sight guidance approach. In: *12th International Conference on Control, Automation and Systems*. Jeju Island, Korea. pp. 2071 – 2073.
- Lekkas, A. M. (2014). Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Li, Z.; Sun, J.; Oh S. (2009). Path following for marine surface vessels with rudder and roll constraints: an mpc approach. In: *American Control Conference, 2009. ACC09..* IEEE. pp. 3611–3616.
- Liang, X.; Zhang, J.; Qin Y.; Yang H. (2013). Dynamic modeling and computer simulation for autonomous underwater vehicles with fins. *Journal of Computers* **8**(4), 1058–1064.
- Lindgaard, K. (2003). Acceleration feedback in dynamic positioning.
- Liu, T.; Dong, Z.; Du H.; Song L.; Mao Y.; (2017). Path following control of the underactuated usv based on the improved line-of-sight guidance algorithm. *Polish Maritime Research*, **24**(1), 3–11.
- Manley, J. E. (1997). Development of the autonomous surface craft. In: *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings*. Vol. 2. IEEE. pp. 827–832.
- Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*. IEEE. pp. 1–4.
- Miao, J.; Shaoping, W.; Zhiping Z. (2017). Compound line-of-sight nonlinear path following control of underactuated marine vehicles exposed to wind, waves, and ocean currents. *Nonlinear Dynamics* **84**(4), 2441–2459.
- Minorsky, N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *Journal of ASNE* **42**(2), 280–309.
- Miranda, L. (2016). Sistema de guiado desacoplado en 3D para el vehículo *HRC–AUV*. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

- Moe, S.; Caharija, W.; Pettersen K. Y.; Schjolberg I. (2014). Path following of underactuated marine surface vessels in the presence of unknown ocean currents. In: *American Control Conference (ACC), 2014*. IEEE. pp. 3856–3861.
- Moreno, D.; Besada, E.; López J. A.; Chaos D.; Aranda J.; Cruz J. M. (2015). Identificación de un modelo no lineal de un vehículo marino de superficie usando regresión simbólica. In: *XXXVI Jornadas de Automática*. IFAC. Bilbao, España. pp. 850–855.
- Nielsen, M. C.; Eidsvik, O. A.; Blanke M.; Schjolberg I. (2016). Validation of multi-body modelling methodology for reconfigurable underwater robots. In: *OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. IEEE. California, Estados Unidos. pp. 1–8.
- Pan, Y.-C.; Zhang, H.-X.; Zhou Q.-D. (2012). Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using cfd simulation. *Journal of Hydrodynamics* **24**(6), 840–847.
- Park, S.; Deyst, J.; How-J.P. (2004). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking.. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*.. AIAA. Rhode Island, USA. pp. 1–16.
- Peymani, E.; Fossen, T. I. (2013). 2d path following for marine craft: A least-square approach. *IFAC Proceedings* **46**(23), 98–103.
- Simakis, D. (1992). Vehicle guidance and control along circular trajectories. Tesis de maestría. Naval Postgraduate School. California, Estados Unidos.
- Skjetne, R.; Smogeli, O.; Fossen-T. I. (2004). Modeling, identification, and adaptive maneuvering of cybership ii: a complete design with experiments.. In: *Control Applications in Marine Systems CAMS04*. IFAC. Ancona, Italia. pp. 203–208.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical and research bulletin no. 1-5. SNAME. Nueva York, Estados Unidos.
- Sperry, E. (1922). *Automatic steering*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Stern, F.; Yang, J.; Wang-Z.; Sadat-Hosseini-H.; Mousaviraad M.; Bhushan S.; Xing T. (2013). Computational ship hydrodynamics: Nowadays and way forward. *International Shipbuilding Progress* **60**(1-4), 3–105.
- Sutton, R. ; Geoff, N. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Vol. 69. Iet.
- Sutulo, S. ; Moreira, L ; Guedes-C. (2002). Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. *Ocean Engineering* **29**(1), 1–19.
- Tiano, A.; Sutton, R.; Lozowicki A.; Naeem-W. (2007). Observer kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle. *Control engineering practice* **15**(6), 727–739.
- Valeriano-Medina, Y. (2017). Esquema de guiado y control para el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales de un vehículo subacuático sub-actuado.

- Tesis de doctorado. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli-H.; Rodríguez Y.; Canizares J. R. (2013). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences* **19**(2), 175–200.
- Valeriano-Medina, Y.;Hernández-Julian, A.; Hernández L. (2015). Controlador i-los para el seguimiento de caminos en línea recta de un vehículo autónomo subacuático. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* **36**(2), 15–28.
- Velasco, F. J.; Revestido E.; López E.; Moyano E.; Casado M. H. (2008). Techniques for tuning track-keeping controllers of an autonomous in-scale fast-ferry model. *International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development* **2**(4), 227–236.
- Zhou, J.; Tang, Z.; Zhang H.; Jiao J. (2013). Spatial path following for auvs using adaptive neural network controllers. *Mathematical Problems in Engineering*.

ANEXO A

FUNCIONES SEMIEMPÍRICAS DE LOS COEFICIENTES DE CARGA DEL VIENTO.

En el Capítulo 2 las perturbaciones del viento en los vehículos de superficie se tienen en cuenta usando las funciones semiempíricas propuestas por Blenderman ([Blendermann, 1994](#)). Después de extensas pruebas de túnel de viento, Blenderman presenta los siguientes parámetros de los coeficientes de carga del viento:

$$C_X(\gamma_w) = -CD_{l,A_F}(\gamma_w) \frac{\cos(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2}(1 - \frac{CD_l(\gamma_w)}{CD_t})\sin^2(2\gamma_w)}, \quad (\text{A.1})$$

$$C_Y(\gamma_w) = CD_t \frac{\cos(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2}(1 - \frac{CD_l(\gamma_w)}{CD_t})\sin^2(2\gamma_w)}, \quad (\text{A.2})$$

$$C_N(\gamma_w) = [\frac{SL}{L_{OA}} - 0,18\pi \text{trg}(\frac{\gamma_w}{\pi} + \frac{1}{2})], \quad (\text{A.3})$$

Donde:

$$CD_{l,A_F}(\gamma_w) = \frac{CD_{l,A_F}(0) + CD_{l,A_F}(\pi)}{2} + (CD_{l,A_F}(0) - CD_{l,A_F}(\pi))\text{sqr}(\frac{\gamma_w}{\pi} + \frac{1}{2}), \quad (\text{A.4})$$

$$CD_l(\gamma_w) = \frac{AF}{AL} CD_{l,A_F}(\gamma_w), \quad (\text{A.5})$$

y γ_w es el ángulo de ataque del viento con respecto al vehículo. Las funciones $\text{trg}(\cdot)$ y $\text{sqr}(\cdot)$ son funciones de onda triangular y cuadrada respectivamente con límites en $[-1,1]$ y período 2. Los parámetros para calcular estos coeficientes ([A.1-A.3](#)) son las dimensiones del vehículo, para el caso de una maqueta de investigación como es el *Krick Felix*, los restantes parámetros son tomados de [Blendermann \(1994\)](#) y se muestran en la Tabla [A-1](#):

Tabla A-1: Parámetros para calcular (A.1-A.3) para el *Krick Felix*.

Parámetro	Valor
Número del vehículo	13
A_F	0.0136
A_L	0.0826
L_{OA}	0.634
s_L	0
δ	0.60
$CD_{l,AF(0)}$	0.55
$CD_{l,AF(1)}$	0.60
CD_t	

ANEXO B

CÓDIGO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR *I-LOS*.

Bloque donde se establecen los puntos para el guiado:

```
function [y,finish, xd, yd] = fcn(u)
#codegen

xd y yd      %hacen referencia a los puntos
              %que debe alcanzar el vehículo.

u            %funciona como índice para determinar el punto
              %de la trayectoria que se ha vencido

x=0;

pts=[10 10;
     90 50];

if u >= length(pts)
    x=1;
    u=length(pts)-1;

else
    x=0;
end
```

```

    finish=x;

    xd=pts(:,1);
    yd=pts(:,2);
    y = [pts(u,:) pts(u+1,:)];

```

Bloque de guiado: Aquí se determinan los valores del error de seguimiento perpendicular al camino y el ángulo de rotación del mismo. También se determina si el punto del camino a alcanzar ha sido vencido.

```

function [error,alpha, next] = fcn(pts, x, y)
#codegen

%next indica si el punto ha sido vencido o no

xk=pts(1); %punto actual del camino
yk=pts(2);

xk1=pts(3); %punto a vencer del camino
yk1=pts(4);

alpha=atan2(yk1-yk, xk1-xk); %ángulo del camino

st=(x-xk)*cos(alpha)+(y-yk)*sin(alpha);      %error de seguimiento
                                              a lo largo del camino
et=-(x-xk)*sin(alpha)+(y-yk)*cos(alpha);      %error de seguimiento
                                              perpendicular al camino

sk1=(xk1-xk)*cos(alpha)+(yk1-yk)*sin(alpha); %distancia entre los puntos
                                              del camino entre
                                              los que se encuentra el vehículo

r=1.2;                                         %radio del círculo de aceptación

if (sk1-st)<=r                                %condición de punto vencido
    next=1;
else
    next=0;

```

```
end
```

```
error = et;  
alph = alpha;
```

Controlador de seguimiento *I-LOS*

```
function [controlador,yint1] = fcn(u,yint,kp,k)  
#codegen
```

```
yint          %término integral del error  
kp=1/delta;   %ganancia proporcional  
k=0.5;        %parámetro de diseño
```

```
error=u;      %error de seguimiento  
              perpendicular al camino  
delta= 2;     %distancia lookahead
```

```
yintd=(error*delta)/(delta^2+(error+k*yint)^2);  
controlador=kp*error+kp*k*yint;
```

```
yint1=yintd;  %derivada del término integral del error
```