

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Esquema de guiado NLGL aplicado al vehículo marino *Krick Felix*

Autor del trabajo: Ernesto Mesa Suárez

Tutores del trabajo: Ing. Luis Enrique Hernández Morales

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 NLGL aplicado al vehículo marino *Krick Felix*

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Ernesto Mesa Suárez
email: emsuarez@uclv.cu

Tutor: Ing. Luis Enrique Hernández Morales
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: luhmorales@uclv.cu

Dr.C Yunier Valeriano Medina Prof. Auxiliar
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: yunierv@uclv.edu.cu

Santa Clara

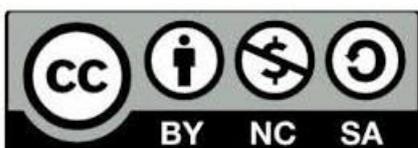
2018

“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

“La vida es una preparación para el futuro; y la mejor preparación para el futuro es vivir como si no hubiera ninguno”.

A. Einstein.

DEDICATORIA

A mamá y papá
Gracias por su confianza y apoyo incondicional, sin ustedes nada de esto habría sido posible.

A mi hermanita
Lo mas lindo que tengo en esta vida.

A mi novia
Por su comprensión, apoyo y paciencia para conmigo.

A Jose.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por la educación que me han dado, por estar presente cuando los he necesitado, apoyándome en cada uno de mis anhelos.

A mi novia, que en estos cinco años me ha apoyado incondicionalmente en todos mis planes.

A mis abuelos, por su preocupación y cariño.

A mis primos y tíos, por estar atentos y brindarme su ayuda cada vez que la necesitaba.

A mis tutores, por el tiempo y dedicación invertido para que esta investigación se realizara con la mejor calidad posible.

A mis compañeros de la universidad, por compartir conmigo, los buenos y malos momentos durante estos cinco años, que no valoraba cuando empecé, y mientras escribo estos agradecimientos me doy cuenta de lo importante que han sido en mi vida. En especial a Angel, quien considero mi hermanito. A Pedro, Jose Roberto, Lizander, Alexander, Jorge Javier, Victor, Juan Alberto, Carlos, Adrián, Guillermo, y a todos los demás que me formaron parte del grupo.

A todos los profesores, que durante los cinco años influyeron en mi formación como persona y como profesional.

Santa Clara, Cuba, 2018

RESUMEN

En la actualidad el uso de vehículos marinos no tripulados está cobrando importancia por su gran gama de aplicaciones. Dentro de estos se encuentran los vehículos de superficie no tripulados. En esta investigación se demuestra de manera analítica como el algoritmo de guiado NLGL aplicado al bote robótico *Krick Felix* es capaz de rechazar el efecto de las corrientes marinas, garantizando cero error en estado estable para el caso de seguimiento de caminos formados por varios tramos rectos. A partir del segundo método de *Lyapunov* se demuestran las propiedades de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL, siendo este, asintóticamente estable cuando se sigue una trayectoria recta. El comportamiento de la embarcación durante las misiones y los resultados expuestos anteriormente se corroboran mediante pruebas simuladas y reales, relacionadas con el escenario de control de seguimiento de caminos sin restricciones temporales.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE GUIADO EN VEHÍCULOS AUTÓNOMOS MARINOS	5
1.1. Introducción	5
1.2. Evolución y desarrollo de la automática en los vehículos marinos	5
1.3. Descripción general del <i>Krick Felix</i>	7
1.4. Modelado de vehículos marinos	11
1.5. Sistema de control de movimiento	13
1.5.1. Sistema de navegación	13
1.5.2. Sistema de control	13
1.5.3. Sistema de guiado	14
1.6. Algoritmo de guiado	14
1.7. Algoritmo NLGL	16
1.8. Consideraciones finales.	17
2. MODELADO MATEMÁTICO	18
2.1. Introducción	18
2.2. Ecuaciones de movimiento para vehículos marinos	18
2.2.1. Dinámica del cuerpo rígido	20
2.2.2. Términos de masas añadidas	20

2.2.3.	Amortiguamiento hidrodinámico	21
2.2.4.	Modelo de los Actuadores	21
2.3.	Modelo dinámico no lineal de 3 GDL para el <i>Krick Felix</i>	22
2.4.	Modelos linealizados	23
2.4.1.	Subsistema lateral	24
2.5.	Ecuaciones para modelar las corrientes marinas	25
2.6.	Comportamiento del modelo no lineal de 3 GDL	26
2.7.	Consideraciones finales del capítulo	28
3.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y RECHAZO DE PERTURBACIONES DEL ALGORITMO DE GUIADO NLGL	29
3.1.	Introducción	29
3.2.	Algoritmo de guiado NLGL	29
3.2.1.	Linealización del algoritmo	32
3.3.	Análisis del rechazo a perturbaciones del esquema de guiado propuesto	32
3.4.	Análisis de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL	34
3.4.1.	Definiciones	35
3.4.2.	Función definida positiva localmente y función definida positiva	36
3.4.3.	Segundo método de <i>Lyapunov</i>	36
3.5.	Estabilidad del algoritmo de guiado NLGL.	36
3.6.	Consideraciones finales del capítulo	38
4.	AJUSTE Y DESEMPEÑO DEL ALGORITMO NLGL	39
4.1.	Introducción	39
4.2.	Resultado de las simulaciones	39
4.2.1.	Evaluación de un camino formado por dos puntos	40
4.2.2.	Evaluación de un camino formado por varios tramos rectos	40
4.3.	Pruebas Reales	42
4.4.	Análisis económico y medioambiental	43
4.5.	Consideraciones finales del capítulo	44
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	46

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
A. ANÁLISIS DE RECHAZO DE PERTURBACIONES DEL ALGORITMO DE GUIADO NLGL	52

INTRODUCCIÓN

El océano cubre dos terceras partes de la superficie del planeta Tierra y tiene un gran efecto, en el futuro de la existencia de los seres humanos. Alrededor del 37 % de la población mundial vive a 100 kilómetros del océano (Yuh, 2001). Generalmente el enfoque es hacia la tierra y las condiciones atmosféricas, dejando pasar por alto los abundantes recursos presentes en el mar.

Para poder explotar estos recursos resulta necesario el uso de vehículos marinos. Este término incluye barcos, semi-sumergibles, submarinos, vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV) o autónomamente (AUV), torpedos y otras estructuras propulsadas y energizadas capacitadas para navegar (Fossen, 2011). Los navíos o barcos, según la Real Academia de la Lengua Española, son embarcaciones construidas para flotar por encima de la superficie del agua, estas se utilizan con propósitos de transportación y navegación. Además de estos propósitos generales, las embarcaciones marinas pueden ser utilizadas en diversos ámbitos como por ejemplo en aplicaciones de defensa y seguridad (protección de costas, infraestructuras marítimas, etc.) (Allotta, 2015; Bingham, 2010).

Un vehículo autónomo es aquel que puede funcionar sin la acción directa de un ser humano, y pueden ser controlados remotamente (Fossen, 2011). Existen distintos tipos de vehículos autónomos (Sujit, 2014): vehículo aéreo no tripulado (UAV), vehículo terrestre no tripulado (UGV), vehículo autónomo de superficie (ASV) y vehículo autónomo subacuático (AUV). Estos dos últimos engloban los vehículos marinos no tripulados (UMV).

Los vehículos autónomos de superficie han sido empleados en un amplio rango de aplicaciones tanto militares como comerciales (Manley, 2008). En el apartado militar se encuentran los detectores de minas, los utilizados para la vigilancia y reconocimiento de costas, para la guerra anti-submarina y en las simulaciones de ataque costero para combates de entrenamiento (Shin, 2017). En el ámbito de aplicaciones comerciales incluyen exploraciones y construcciones de infraestructuras para el gas y el petróleo, colección de datos sobre el océano, hidrografía y reconocimiento medioambiental (Shin, 2017).

Para que estos vehículos puedan llevar a cabo sus tareas es necesario que cuenten con un sistema de control de movimiento; que requiere de un sistema de navegación, un sistema de control y un sistema de guiado (Valeriano Medina, 2013). En estos sistemas se identifican dos elementos fundamentales: el controlador de rumbo del vehículo y un algoritmo o ley de dirección para controlar el proceso de guiado. El diseño de un sistema de esta envergadura se torna muy complejo, esta tarea desafía a los especialistas a trabajar con sistemas multivariables, difíciles de modelar por su alto grado de no linealidad y constante interacción con las perturbaciones medioambientales (Wiig, 2016).

En nuestro país el desarrollo de los vehículos no tripulados es escaso, sin embargo el Grupo de Automática, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV) ha venido realizando un número importante de investigaciones relacionadas con el seguimiento de trayectoria de vehículos autónomos. Para ello adquirió el *Krick Felix*, un bote robótico, con vistas a continuar los estudios que viene realizando en la temática de modelado, control y guiado de embarcaciones marinas. Se ha llegado a evaluar su buen comportamiento durante la ejecución de las misiones mediante pruebas simuladas (Hernández, 2017b). En las primeras investigaciones realizadas por el grupo se utiliza la estrategia de guiado *LOS* y los valores de rumbo se determinaban directamente a partir de las coordenadas de los puntos que forman parte de la trayectoria a recorrer (Rodríguez, 2011). La estrategia *LOS* no puede garantizar cero error ante perturbaciones, para ello se le agrega una acción integral (Breivik, 2008). Esta estrategia se conoce en la literatura como *I-LOS* y en los últimos años se ha utilizado frecuentemente en vehículos marinos (Lekkas, 2014; Caharija, 2016).

El algoritmo de guiado *NLGL* (*Nonlinear guidance law*) es otra estrategia que ha comenzado a estudiarse recientemente por el GARP para el seguimiento de trayectorias rectas y circulares. Con esta estrategia se elimina la influencia de las perturbaciones sin la necesidad de agregar una acción integral, lo cual representa una ventaja con respecto a *I-LOS*. Para el GARP es de vital importancia continuar estudiando el algoritmo de guiado *NLGL* ya que no necesita la medición del ángulo de guiñada. La medición de este tipo de variable ha presentado problemas durante pruebas experimentales realizadas por el GARP, debido a que los instrumentos que la miden son sensibles a campos magnéticos. El algoritmo *NLGL* se encuentra implementado en *Arduino* y en los controladores que se han venido utilizando por el grupo para llevar a cabo las misiones (Hernández, 2017a). Este algoritmo ha sido desarrollado fundamentalmente para su uso en vehículos aéreos (Park, 2007). Sin embargo recientemente se ha demostrado su factibilidad en el seguimiento de caminos rectos y curvos aplicado a vehículos marinos (Hernández, 2017b; Moreno, 2009).

Por lo tanto se plantea el siguiente **problema científico**: debido a las no linealidades que caracterizan la dinámica del vehículo *Krick Felix*, así como al efecto que provocan las corrientes marinas, es necesario analizar las propiedades de estabilidad y rechazo a perturbaciones del algoritmo de guiado NLGL durante el seguimiento de caminos rectos.

Con esta investigación se pretende cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Analizar las propiedades de estabilidad y rechazo a perturbaciones del esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL que se emplea para el seguimiento de caminos rectos en el bote *Krick Felix*.

Objetivos específicos:

1. Establecer los aspectos teóricos relacionados con la temática que aparecen reportados en la literatura.
2. Demostrar las condiciones de estabilidad y rechazo a perturbaciones del algoritmo de guiado NLGL.
3. Establecer un esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL para el bote robótico *Krick Felix*.
4. Evaluar mediante simulación y pruebas experimentales los resultados durante el seguimiento de caminos rectos.

Hipótesis:

Un esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL garantiza estabilidad y precisión durante el seguimiento de caminos rectos por parte del vehículo *Krick Felix*, a pesar de la presencia de las corrientes marinas.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente expuestos se propone ejecutar las siguientes tareas:

- Identificación de la literatura especializada relacionada con la temática del guiado de vehículos marinos.
- Estudio de la dinámica del bote robótico *Krick Felix*.
- Estudio el modelo matemático que representa las corrientes marinas.
- Análisis de los postulados matemáticos del algoritmo de guiado NLGL.
- Definición de un esquema de guiado basado en NLGL para el bote robótico *Krick Felix*.
- Demostración de manera analítica del rechazo de perturbaciones que se logra con el algoritmo de guiado NLGL.

- Demostración de las propiedades de estabilidad que se logran con el algoritmo de guiado NLGL.
- Realización de pruebas experimentales con el bote *Krick Felix*.
- Evaluación mediante simulación y experimentos reales de los resultados de la investigación.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

Contenido de la Tesis:

El informe de la investigación presenta la siguiente estructura:

Capítulo I: A partir de un estudio de la bibliografía especializada se presenta una descripción del bote robótico *Krick Felix*. Se efectúa un análisis de los principales aspectos relacionados con la temática del seguimiento de caminos por parte de los vehículos marinos y del algoritmo de guiado NLGL.

Capítulo II: Se presentan los modelos dinámicos del bote robótico *Krick Felix* y de las perturbaciones medioambientales, específicamente las corrientes marinas. Se realiza un análisis del comportamiento del modelo no lineal de 3 grados de libertad (GDL) del *Krick Felix*.

Capítulo III: Se definen los postulados matemáticos del algoritmo NLGL. Se realiza un análisis del rechazo a perturbaciones del algoritmo de guiado para el esquema propuesto en esta investigación. Se hace un análisis de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL.

Capítulo IV: Se definen los rangos admisibles de los parámetros que intervienen en el ajuste del controlador y se define el esquema de guiado basado en NLGL para el bote robótico *Krick Felix*. Se presentan los resultados de la simulación del esquema de guiado, así como los resultados de pruebas experimentales. Además, se realiza el análisis económico de la investigación.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE GUIADO EN VEHÍCULOS AUTÓNOMOS MARINOS

1.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la revisión bibliográfica realizada sobre la temática del guiado de vehículos marinos. Se ofrece una descripción del bote robótico *Krick Felix*. Se describen los diferentes escenarios de control para el guiado, haciendo énfasis en el seguimiento de caminos sin restricciones temporales (*Path Following*). Se realiza un análisis de las principales estrategias utilizadas para el guiado en este contexto.

1.2. Evolución y desarrollo de la automática en los vehículos marinos

El término embarcaciones marinas incluye a varios tipos de estructuras propulsadas y energizadas que operan en el mar. Entre ellas encontramos barcos, semi-sumergibles, plataformas flotantes, vehículos subacuáticos no tripulados entre otras (Fossen, 2011).

Dentro de las embarcaciones marinas se encuentran a los vehículos de superficie no tripulados (*USV*). Estos incluyen aquellas embarcaciones marinas que por su alto grado de autonomía no necesitan de la acción directa de un operador para llevar a cabo determinadas misiones en ambientes hostiles (Manley, 2008).

Durante la Segunda Guerra Mundial los *USV* fueron desarrollados con fines como la detección de minas y la evaluación de los daños ocasionados después de las batallas, tanto que llegaron a emplearse para obtener muestras radioactivas después de las explosiones nucleares que tuvieron lugar en Hiroshima y Nagasaki (Navy, 2007).

Los roles que puede tomar un *USV* hoy en día son muy diversos, llegándose a usar en áreas inhóspitas donde la recolección de datos puede durar largos períodos de tiempo. Otra aplicación emergente de los *USV* es su utilización en la vigilancia costera. Un ejemplo de esto es el *Independent USV* de la Figura 1-1 (Martin, 2013).

Desde finales del pasado siglo se ha impulsado el desarrollo de prototipos de *USV* con fines educativos. Tanto es así que el Programa Marino de Becas del *MIT* abrió un proyecto con fines de desarrollar un prototipo de vehículo autónomo de superficie para inspecciones precisas, así como el estudio de comunicación, navegación y control (Caccia, 2005). De estos trabajos surgieron el ARTEMIS, el ACES, y el AutoCat que constituía una mejora mecánica del ACES (Manley, 2008).

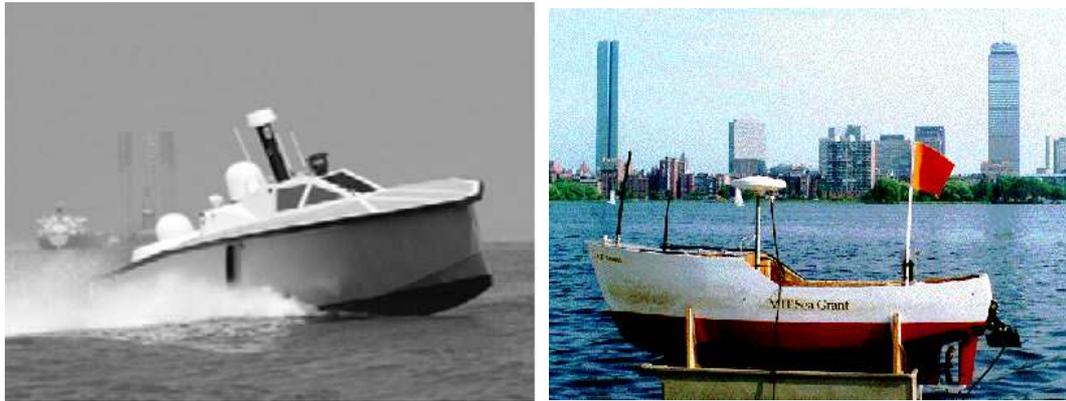
(a) *Independet USV*(b) *ARTEMIS*

Figura 1–1: Embarcaciones de uso civil y militar

Para llevar a cabo investigaciones tanto en la rama del control como del modelado, el Departamento de Ingeniería Cibernética de la Universidad de Noruega de Ciencia y Tecnología ha desarrollado embarcaciones a escala como es el caso del *Cybership* (Figura 1–2).

El *Cybership I* (CS1) tiene dos propelas principales en la popa y dos propulsores en la proa. Está equipado con un procesador dSPACE encargado de transmitir las coordenadas calculadas por el sistema de cámaras que se utilizan en los experimentos. El procesador se comunica con una computadora *Pentium* a 166 MHz, en ella se implementa el control. Las señales al propulsor son enviadas a través de un procesador de señal mediante un transmisor de radio al barco (Pettersen, 2001).

Este prototipo ha sido utilizado para desarrollar estrategias de control de seguimiento para un vehículo marino autónomo (Pettersen, 2001). Otras variantes como la estabilización de barcos usando control integral (Pettersen, 1998) fueron también implementadas en el CS1.

El *Cybership II* (CS2) consta de cinco actuadores para realizar sus movimientos, distribuidos de la siguiente manera: la popa posee dos propelas principales con timones y la proa cuenta con un pequeño propulsor de dos hojas. A bordo hay instalado un sistema empotrado que trabaja a 300 MHz, donde se ejecuta el Sistema Operativo de Tiempo

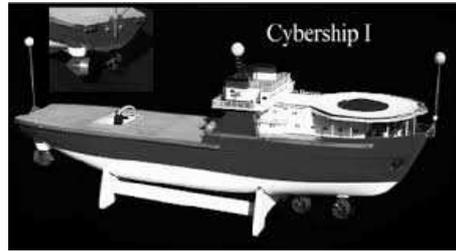
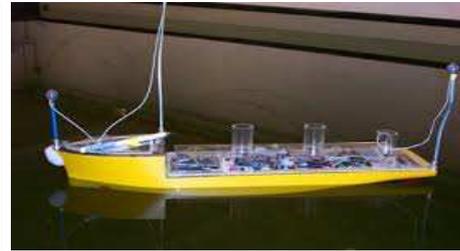
(a) *Cybership I*(b) *Cybership II*(c) *Cybership III*

Figura 1–2: Embarcaciones utilizadas en tareas investigativas

Real QNX, el cual junto a micro componentes *Photon* y paquetes de desarrollo GNU (*GNU's Not Unix*) conforma la Plataforma de Tiempo Real QNX (RTP).

El modelo más actual, el *Cybership III* (CS3), está equipado con dos propelas ubicadas en la popa y dos propulsores en la proa. El hardware a bordo está compuesto por una computadora que usa el Sistema Operativo de Tiempo Real QNX. El sistema de control está implementado en una computadora en tierra que se comunica a través de una conexión inalámbrica. En esta embarcación se ha evaluado el desempeño de tres controladores de posición diferentes: controlador no lineal multivariable PID y el controlador robusto H_∞ (Hassani, 2012).

1.3. Descripción general del *Krick Felix*

El *Krick Felix* (Figura 1–3) es un modelo a escala de un buque del puerto de Hamburgo que ha adquirido recientemente el GARP para continuar abordando la temática del guiado en vehículos autónomos. Este barco original fue construido en el año 1960, y ha sido usado para operaciones portuarias y de transportación.

El casco del *Krick Felix* 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

Figura 1–3: *Krick Felix*.

una propela acoplada. Algunas de las principales especificaciones de la embarcación se muestran en la Tabla 1–1.

Tabla 1–1: Especificaciones geométricas, físicas e inerciales del *Krick Felix*

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad de medida
Longitud	L	0.634	m
Ancho	B	0.128	m
Calado	T	0.035	m
Masa	m	0.8	kg
Radio	r	0.317	m
Momento de Inercia	I_z	0.032	kgm^2
Velocidad crucero	u_0	1.2	m/s

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* (Balanza Llama, 2017). La función del mismo es agrupar diferentes señales *PWM* (*Pulse Width Modulation*) en una.

La arquitectura de hardware concebida e implementada en el *Krick Felix* se muestra en la Figura 1–4 (Balanza Llama, 2017).

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.

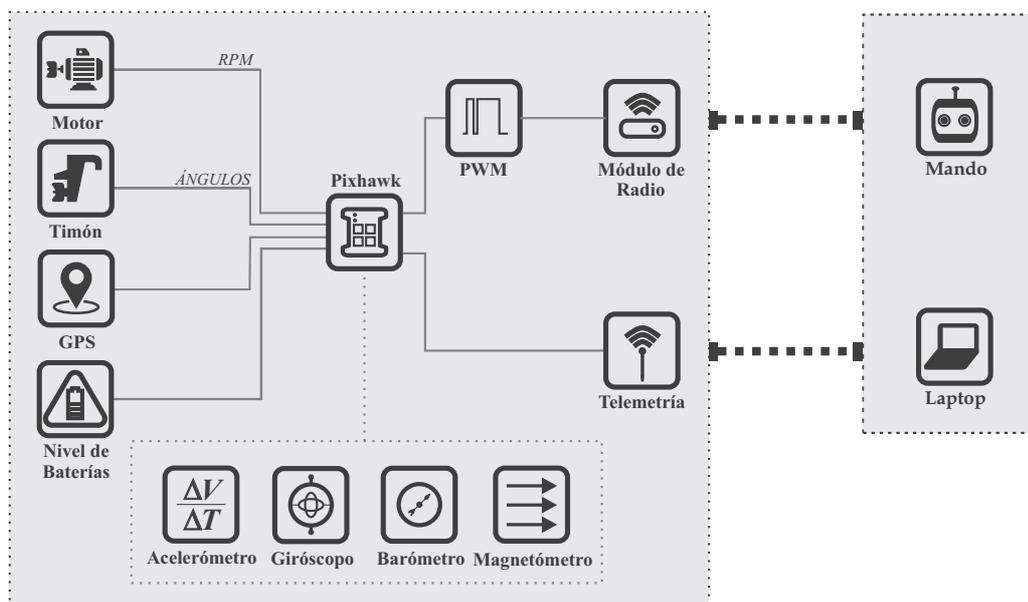
Figura 1-4: Arquitectura de hardware para el *Krick Felix*

Tabla 1-2: Componentes electrónicos

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)

El hardware de control para el vehículo es 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. 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 revoluciones por minuto (rpm). El mismo tiene acoplado un servo motor digital *Robbe FS61bb* de 4.8 - 6 V.



Figura 1-5: Componentes electrónicos

En la laptop se ejecuta *Mission Planner*, una herramienta para para la configuración, supervisión, simulación y control de plataformas *Ardupilot* (ver Figura 1-6). Es compatible con *Windows* y puede ser utilizado para la configuración o como suplemento para el control dinámico de un vehículo autónomo.

Entre las principales funcionalidades que brinda este *software* se encuentran ([ArduPilot, 2016](#)):

- Cargar *firmwares* de los proyectos soportados por *Ardupilot*.
- Facilita el ajuste y auto-ajuste de los controladores internos encargados del comportamiento del vehículo.
- Planificar, cargar y guardar misiones autónomas.
- Permite monitorear el estado del vehículo durante la ejecución de la misión y cambiar parámetros de la misma.
- Posibilidad de operar el vehículo en modo vista en primera persona *First Person View*

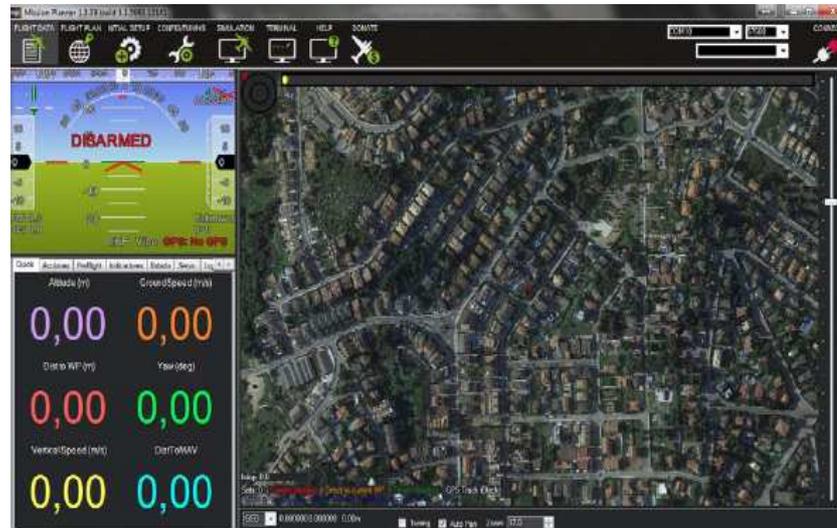


Figura 1-6: Plataforma *Mission Planner*

En la Figura 1-7 se presenta el montaje de los elementos de hardware en la embarcación.



Figura 1-7: Elementos de hardware instalados en el *Krick Felix*

1.4. Modelado de vehículos marinos

Para que se puedan llevar a cabo las misiones, y sintonizar los controladores necesarios, es indispensable contar con un modelo dinámico del vehículo que represente sus principales características y pueda ser utilizado en tareas de control y de simulación (Valeriano, 2017).

Los movimientos de una embarcación marina llegan a ser afectados por varios fenómenos. Estos pueden ser las olas, el viento y las corrientes marinas. Las influencias de estas perturbaciones los hacen ser más complejos que los terrestres o aéreos, de modo que, además de las ecuaciones de un sólido rígido hay que tener en cuenta los efectos hidrostáticos e hidrodinámicos (Cruz, 2012).

Los modelos se utilizan para predecir y simular el comportamiento de las embarcaciones, como también para el diseño de controladores y observadores. Se pueden clasificar en tres tipos de modelos, atendiendo a su complejidad y al número de ecuaciones diferenciales que emplean (Fossen, 2011):

Modelo de simulación: Este tipo de modelo constituye la representación más exacta de un sistema. Incluye la dinámica del sistema de propulsión de la embarcación, el sistema de medición y las fuerzas medioambientales producidas por el viento, las olas y las corrientes marinas. Además, se tienen en cuenta otras características que no se utilizan en el diseño del controlador y del observador, pero que influyen en la exactitud del modelo.

Modelo para el diseño del control: El modelo para el control es de orden reducido o una versión simplificada del modelo de simulación. En su forma más simple, este modelo se utiliza para calcular las ganancias de un controlador convencional tipo PID.

Modelo para el diseño del observador: Su propósito es representar la dinámica asociada con los sensores y algoritmos de navegación, así como con las perturbaciones. Se trata de una versión simplificada del modelo de simulación, donde la mayor atención recae en el modelado del ruido presente en la medición, el filtrado y la predicción del movimiento. En las embarcaciones marinas, el observador a menudo incluye una representación de las perturbaciones, que tiene como objetivo estimar las olas, el viento y las corrientes marinas mediante el tratamiento de los ruidos.

El vehículo autónomo de superficie *Springer*, construido por el Consejo de Investigación de Ingeniería y Ciencias Físicas, por sus siglas en inglés (EPSRC), del Reino Unido, es un ejemplo de la importancia del modelo dinámico de las embarcaciones. En este caso se obtiene un modelo de 3 GDL de la embarcación (Naeem, 2012). Mediante técnicas de identificación de caja negra se hallan los coeficientes hidrodinámicos. Para este propósito un cable umbilical se conecta a la embarcación, desde una *laptop* ubicada en un bote, y se envían los comandos y señales de control. Este método permitió probar los sistemas a bordo del barco y adquirir información para el modelo. El modelo matemático se utilizó para diseñar estrategias de control, tales como *fuzzy* y Control Predictivo basado en Modelo (MPC).

En el GARP se han realizado trabajos como el de (Valeriano, 2017) donde se obtienen los parámetros del modelo no lineal para el vehículo subacuático *HRC-AUV*. Este se realiza teniendo en cuenta perturbaciones medioambientales tales como las olas y las corrientes marinas. Para la obtención del modelo se utiliza la combinación del modelado analítico y semi empírico, apoyado en la realización de pruebas experimentales.

En (Balanza Llama, 2017) se obtiene un modelo no lineal de 3 GDL para el *Krick Felix*. Se utiliza un procedimiento similar al mencionado anteriormente. En el modelo se incluyen los coeficientes relacionados con la dinámica del cuerpo rígido, las masas añadidas, el amortiguamiento y la dinámica de los actuadores. El modelo obtenido se valida a través de pruebas experimentales. Para la realización de este trabajo se utilizará el modelo obtenido en (Balanza Llama, 2017) para evaluar mediante simulación el desempeño del algoritmo de guiado NLGL con la particularidad de que se le incorpora el modelado de las corrientes marinas, lo cual permite analizar el rechazo a este tipo de perturbaciones.

1.5. Sistema de control de movimiento

El sistema de control de movimiento de un vehículo marino consta de tres partes fundamentales (Fossen, 2011): el sistema de guiado, sistema de navegación y sistema de control como se puede observar en la Figura 1-8

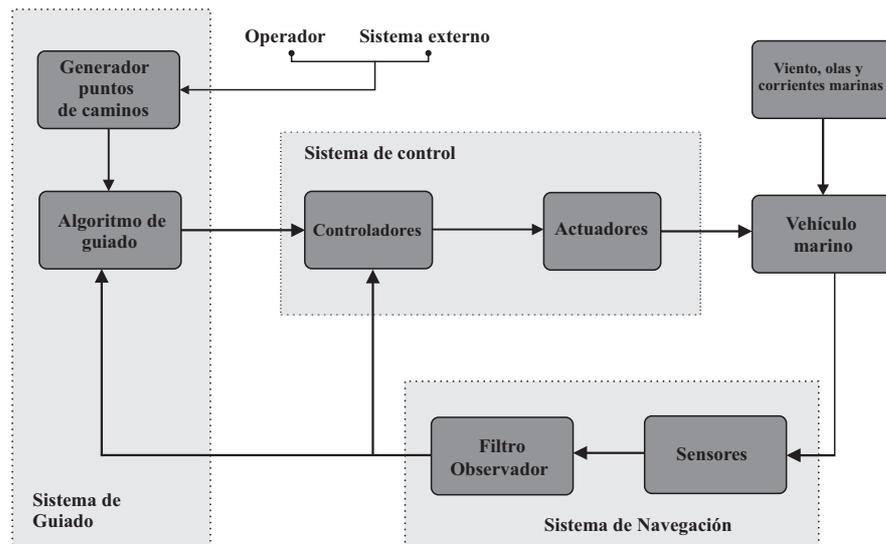


Figura 1-8: Sistema de Control de Movimiento para un vehículo.

1.5.1. Sistema de navegación

El sistema de navegación es el encargado de determinar la posición y distancia recorrida por el vehículo, se puede hacer por la vía del GPS, sensores como acelerómetros y giroscopios, o una combinación de ambos (Perez, 2006). Sobre la base del camino y los datos obtenidos por el sistema de navegación, se calcula la referencia que utiliza el sistema de control, el cual manipula los actuadores para posicionar la embarcación en las coordenadas deseadas (Sehuveret Hernández, 2016).

1.5.2. Sistema de control

Este es el encargado de determinar las fuerzas y momentos que necesita el vehículo para satisfacer un determinado objetivo de control (Fossen, 2011). La implementación

del algoritmo de control implica el diseño de controles realimentados y leyes de control anticipatorio. El sistema de control al basarse en las trayectorias de referencia generadas por el sistema de guiado, calcula las fuerzas necesarias que cada uno de los actuadores debe producir (Lekkas, 2014).

1.5.3. Sistema de guiado

El guiado representa la metodología básica que determina el comportamiento del movimiento transitorio de los vehículos, con la intención de lograr el control sobre el movimiento en el seguimiento de caminos (Breivik, 2008). Es el sistema que calcula continuamente la posición de referencia, la velocidad y la aceleración del vehículo para ser utilizada por el sistema de control de movimiento. Sus componentes básicos son sensores de movimiento, datos externos tales como los meteorológicos (velocidad y dirección del viento, altura y pendiente de las olas) y un ordenador encargado de recopilar y procesar la información, y luego enviar los resultados al sistema de control de movimiento (Lekkas, 2014).

1.6. Algoritmo de guiado

El término guiado en un cuerpo u objeto se refiere al método o procedimiento empleado para dirigir su movimiento. El guiado constituye la acción de conducir la trayectoria de un objeto hacia un punto que puede estar en movimiento (Breivik, 2010).

El sistema de guiado está constituido por dos partes fundamentales, una orientada a la generación del camino, mientras que la otra se encarga de los algoritmos que permiten el seguimiento. Por otra parte es el encargado de suministrar al controlador variables importantes de forma continua, tales como: velocidad, posición y aceleración con el fin de que el vehículo recorra la ruta de una manera lo más precisa posible (Fossen, 2011; Cruz, 2012).

La geometría del camino es un aspecto importante en la construcción del mismo. Independientemente de las disímiles clasificaciones que existen hay dos que son esenciales: los caminos rectos y los curvos (Lekkas, 2014). El seguimiento por parte de un vehículo marino de un camino recto se considera el caso más simple, el cual interesa en este estudio para realizar un análisis de estabilidad y rechazo de perturbaciones. En este caso el error perpendicular al camino es variable en el tiempo, mientras que el ángulo tangencial al mismo permanece constante.

Según el tipo de maniobra que se desee realizar, debe seleccionarse el escenario de control a desarrollar en el sistema de guiado (Breivik, 2008). Estos escenarios en algunas

ocasiones deben considerar la información sobre los movimientos futuros que deberá realizar el vehículo y en todos los casos el objetivo de control constituye una tarea en el espacio de trabajo. Estos escenarios son (Breivik, 2010):

Seguimiento de un objetivo (*Target Traking, TT*): Se caracteriza por el seguimiento de un objetivo, el cual puede estar estacionario o en movimiento, de manera que solo se conoce su velocidad instantánea y no hay información acerca de su movimiento futuro. En estos casos no es posible separar las restricciones espaciales de las temporales.

Seguimiento de un objetivo a lo largo de una trayectoria (*Path Traking, PT*): Sigue un objetivo que se mueve a través de un camino predefinido. En este son de interés las restricciones temporales y espaciales.

Maniobras a lo largo de un camino (*Path Maneuvering, PM*): Intenta optimizar el seguimiento de un camino predefinido donde se priorizan las restricciones espaciales por encima de las temporales debido a las limitaciones de maniobrabilidad de vehículos.

Seguimiento de camino (*Path Following, PF*): Busca seguir un camino predefinido y solo involucra a las restricciones espaciales.

Las soluciones de guiado para el escenario *path following*, con el que se trabaja en esta investigación, pueden ser separadas en dos grupos, geométricas y de control. Las técnicas de control son ampliamente utilizadas en *PF*, principalmente las no lineales (Caharija, 2015; Zheng, 2016). En (Garus, 2016) se utiliza una ley no lineal de tipo *PD*, con el objetivo de lograr que un vehículo subacuático siga una trayectoria de referencia en el plano horizontal. Un inconveniente de este método es que no garantiza en todo momento estabilidad asintótica. Existen otras técnicas bien conocidas como el control en modo deslizante (Li, 2013), el control predictivo basado en el modelo (Zheng, 2016; Yu, 2015) y el control inteligente (Yu, 2016). Muchos de estos casos consisten en controladores multivariables complejos cuyas implementaciones no resultan factibles en embarcaciones que operan en condiciones de tiempo real.

Las principales soluciones geométricas que se emplean datan de investigaciones relacionadas con el movimiento de los misiles (Breivik, 2008). Una de las más utilizadas es la estrategia conocida como Línea de Visión (*Line of Sight, LOS*). Es una de las estrategias más utilizadas cuando se desea realizar el seguimiento de un camino previamente definido, existiendo variantes para el seguimiento de caminos rectos y curvos (Lekkas, 2014). En trabajos más recientes (Liu, 2017), se propone un control de seguimiento basado en una modificación del algoritmo *LOS*. Otras modificaciones se han realizado a esta estrategia con el fin de minimizar o anular el efecto de las perturbaciones sobre

los vehículos. Como ejemplo de ello en (Lekkas, 2014) se agrega una acción integral a la estrategia, convirtiéndola en *I-LOS* para disminuir el efecto de las corrientes marinas. El GARP ha venido realizando varias investigaciones en este campo, obteniendo varios resultados. En una primera investigación se utiliza *LOS* como estrategia de guiado. Posteriormente en pruebas realizadas con el HRC-AUV se comprueba que no es capaz de rechazar las perturbaciones debido a que no garantiza cero error durante el seguimiento (Valeriano Medina, 2013). Esto conlleva a que se realicen algunas variaciones corrigiendo el cálculo del ángulo de rumbo a partir de la distancia *lookahead* (Lemus, 2011; Zamora, 2011). Con la estrategia *I-LOS* el grupo ha obtenido buenos resultados, evaluados mediante simulación, usando tramas de datos obtenidos en experimentos reales para el caso de trayectorias rectas (Hernández, 2014). En la tesis doctoral de Yunier Valeriano (Valeriano, 2017) se propone un esquema de guiado basado en un controlador *I-LOS* en cascada con un controlador de dirección en modo deslizante que garantiza convergencia y exactitud durante el seguimiento de caminos rectos. La medición del ángulo de guiñada ha sido uno de los problemas presentados por el GARP en sus investigaciones, el algoritmo utilizado en esta investigación no precisa de ella.

1.7. Algoritmo NLGL

El algoritmo NLGL es una ley no lineal de guiado que se ha venido desarrollando en los últimos años. La misma ha demostrado un buen rendimiento en el guiado de *UAV*. La lógica que utiliza hace que durante el seguimiento de caminos rectos se comporte con una estructura similar a la de un controlador *PD*, mientras que durante el seguimiento de caminos curvos, la lógica posee elementos de control anticipatorio (Park, 2007). Para el cálculo de la aceleración lateral se usa la velocidad inercial del vehículo, añadiendo esto, una capacidad de adaptación ante perturbaciones externas como el viento.

En una investigación posterior se le realizan varias modificaciones al algoritmo con el fin de corregir limitaciones como el cálculo de la aceleración lateral, la cual se indefinía cuando el vehículo se encuentra muy alejado de la trayectoria deseada. Esta nueva ley se denomina L_2^+ y los resultados de la misma se demuestran mediante simulación en un *UAV* con un modelo de 6 GDL, demostrando buenos resultados (Curry, 2013). Su desempeño en *UAV* ha sido comparado con otros algoritmos, destacando por requerir poco esfuerzo de control y por ser capaz de seguir distintos tipos de caminos con resultados positivos (Sujit, 2014).

En trabajos como el de (Moreno, 2009) se propone utilizar esta ley de guiado en vehículos marinos. Se realizan pruebas simuladas donde se demuestra que el algoritmo es capaz de seguir distintos tipos de caminos en un *USV*, en diferentes circunstancias y ofreciendo buenas prestaciones.

En un artículo más reciente se hace una comparación del algoritmo de guiado NLGL con *Carrot Chasing*, *Pure Pursuit and Line of Sight (PLOS)* y *Vector Field*, realizando pruebas simuladas con el modelo dinámico del *USV C-Enduro* (Niu, 2016). La simulación se realizó teniendo en cuenta factores externos como el viento y las corrientes marinas. Los autores llegan a varias conclusiones como que el algoritmo NLGL es capaz de llevar a cabo las misiones con mayor precisión ante la influencia de las perturbaciones, sin embargo, en términos de esfuerzo de control *Vector Field*, requiere menos. Por otra parte para el seguimiento de caminos en espacios reducidos, donde haya que evadir objetos estáticos o dinámicos el algoritmo NLGL es capaz de satisfacer las necesidades, mientras que cuando las misiones sean de mayor alcance como mar abierto, donde no es necesaria tanta precisión, *Vector Field* puede aportar mayor capacidad de resistencia (Niu, 2016).

Este algoritmo se ha venido estudiando por parte del GARP en los últimos años, por ser el que está implementado en el hardware *Arduino* que ha adquirido recientemente el grupo. En una primera aproximación se aborda su implementación en *Ardupilot*. Se comprueba mediante simulación su factibilidad para usarlo en un *AUV* realizando un ajuste del algoritmo, para que este sea capaz de lograr la convergencia del camino con exactitud (Hernández Morales, 2016). En estudios recientes se utiliza el modelo del bote robótico *Krick Felix* para la simulación del seguimiento de caminos rectos y curvos (Hernández, 2017b).

1.8. Consideraciones finales.

Luego de realizar un análisis de la literatura consultada, se arriban a las siguientes consideraciones.

En la actualidad los *USV* han cobrado gran importancia en el ámbito militar como el civil, siendo capaces de llevar a cabo misiones en lugares inaccesibles para el ser humano. Esto ha proporcionado un aumento de investigaciones en la rama del control de estos vehículos.

El modelo del vehículo resulta necesario para diseñar y evaluar el desempeño del sistema de guiado. En este trabajo se utiliza el modelo no lineal de 3 GDL obtenido para el barco robótico *Kick Felix*, al cual se le añaden los efectos de las corrientes marinas.

Se propone para el vehículo *Krick Felix*, un esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL, que asegure estabilidad y precisión durante el seguimiento de caminos rectos en presencia de las corrientes marinas.

CAPÍTULO 2

MODELADO MATEMÁTICO

2.1. Introducción

En este capítulo se describe la estructura matemática de los modelos del barco de pequeño porte *Krick Felix* obtenidos en trabajos anteriores. Estos modelos son el resultado de aplicar las leyes físicas que rigen la dinámica de un cuerpo rígido que opera en un ambiente líquido. Con el propósito de lograr una representación más exacta del entorno de operación del vehículo, al modelo se añaden las ecuaciones matemáticas para modelar las corrientes marinas, perturbación que se tendrá en cuenta en este trabajo para los distintos tipos de análisis a realizar.

2.2. Ecuaciones de movimiento para vehículos marinos

Durante la navegación un vehículo marino experimenta movimientos en los 6 GDL. Los grados de libertad están determinados por los desplazamientos y rotaciones independientes que especifican totalmente la posición y orientación del vehículo. En la Tabla 2–1 se resume la nomenclatura empleada para describir el movimiento de las embarcaciones marinas (SNAME, 1950).

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

Al analizar los movimientos de las embarcaciones marinas en los 6 GDL es conveniente definir dos sistemas de coordenadas como se indica en la Figura 2–1 (Balanza Llama, 2017). El sistema de referencia móvil es convenientemente fijado en el vehículo y es llamado Sistema del Barco. El origen de este sistema usualmente se sitúa en el Centro

de Gravedad (CG), siempre y cuando el CG pertenezca al plano principal de simetría, como es el caso del *Krick Felix*. Para vehículos marinos los ejes x_0 , y_0 , z_0 coinciden con los ejes principales de inercia y son usualmente definidos como:

- x_0 - eje longitudinal (de popa a proa)
- y_0 - eje transversal (de babor a estribor)
- z_0 - eje normal (de arriba a abajo)

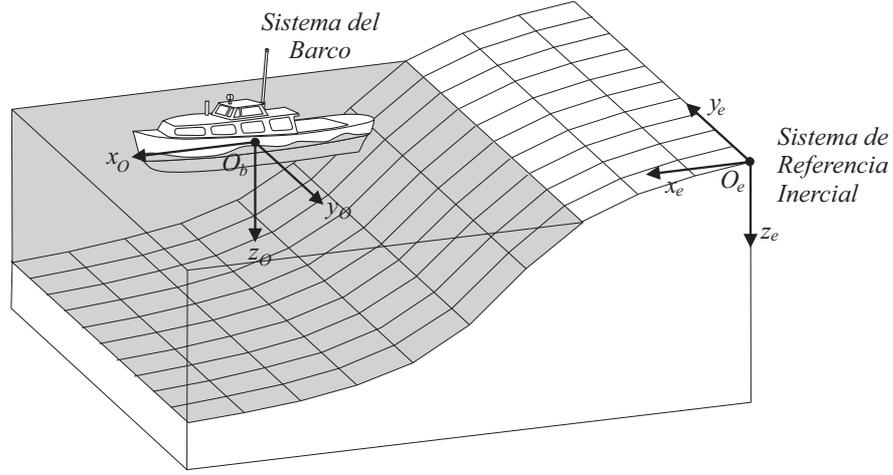


Figura 2-1: Sistemas de coordenadas

Asumiendo que los barcos son longitudinal y lateralmente metacéntricos con pequeñas amplitudes de los ángulos $\phi = \theta = \dot{\phi} = \dot{\theta} \approx 0$, se puede descartar la dinámica de balanceo y cabeceo. La dinámica relativa al movimiento de arfada también se puede despreciar ya que el barco flota con $z \approx 0$. El modelo resultante del barco en el plano horizontal se convierte entonces en un modelo de 3 GDL. Los estados para la embarcación son: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ que denota el vector de posición, $\boldsymbol{\nu} = [u, \nu, r]^T$ velocidades lineal y angular con origen en la embarcación y $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, N]^T$ representa las fuerzas y momentos que actúan sobre el barco en su propio sistema de coordenadas.

Las ecuaciones cinemáticas se pueden expresar en forma vectorial utilizando las transformaciones de ángulos de *Euler* como:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\nu} \quad (2.1)$$

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

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Aplicando la segunda Ley de *Newton* se puede describir el comportamiento dinámico de la embarcación (Fossen, 2002).

$$\underbrace{M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{M_A\dot{\nu} + C_A(\nu)\nu + D(\nu)\nu}_{\text{términos hidrodinámicos}} = \tau \quad (2.3)$$

donde M_{RB} y M_A son la matrices de inercia y masas añadidas del cuerpo rígido, C_{RB} y C_A son las matrices de Coriolis del cuerpo rígido y de masas añadidas, $D(\nu)$ agrupa los términos de amortiguamiento y τ es el vector de las fuerzas de control (Fossen, 2006).

2.2.1. Dinámica del cuerpo rígido

Las matrices M_{RB} y $C_{RB}(\nu)$ están formadas por coeficientes que pueden ser determinados a partir de las propiedades de gravedad e inercia del vehículo. La matriz M_{RB} se determina como:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mX_g \\ 0 & mX_g & I_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

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

2.2.2. Términos de masas añadidas

Las masas añadidas se definen como las fuerzas y momentos inducidos debido al movimiento armónico de la embarcación. Estas son proporcionales a la aceleración del vehículo lo que trae como consecuencia que las masas añadidas y la aceleración estén desfasadas 180 grados con respecto al movimiento armónico del vehículo (Fossen, 2002).

La matriz de masas añadidas M_A y la matriz hidrodinámica de coeficientes de Coriolis $C_A(\nu)$ para embarcaciones que se mueven con velocidad positiva mayor que cero se representan de la siguiente manera:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}\nu - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r \\ 0 & 0 & X_{\dot{v}}u \\ Y_{\dot{v}}\nu + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r & -X_{\dot{v}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.3. Amortiguamiento hidrodinámico

El componente hidrodinámico más complejo de calcular es la matriz de amortiguamiento $D(\nu)$. Los diferentes términos contribuyen al amortiguamiento lineal y al cuadrático, sin embargo, es difícil en general separar estos efectos por lo cual convenientemente se describe el amortiguamiento hidrodinámico total como:

$$D(\nu) = D_l + D_n(\nu) \quad (2.7)$$

donde D_l es la matriz de amortiguamiento lineal y $D_n(\nu)$ es la matriz de amortiguamiento no lineal debido a términos cuadráticos y de orden superior. Solo los términos lineales de la diagonal principal y el parámetro cuadrático $X_{|u|u}$ son determinados para el caso del *Krick Felix*. Por lo que la matriz $D(\nu)$ se reduce a:

$$D(\nu) = -diag\{X_u + X_{|u|u}|u|, Y_v, N_r\} \quad (2.8)$$

2.2.4. Modelo de los Actuadores

Para embarcaciones marinas es necesario distribuir las fuerzas generalizadas de control τ de los actuadores en términos de las entradas de control \mathbf{u} (Fossen, 2011).

Las fuerzas de control producidas por las propelas, timones o estabilizadores son descritas de manera lineal como:

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (2.9)$$

donde \mathbf{K} representa los coeficientes de fuerzas y \mathbf{u} es la entrada de control dependiente del actuador que se considere.

Las fuerzas y momentos en los 3 GDL del *Krick Felix* provocadas por las entradas de control pueden determinarse como:

$$\tau = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{rxf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_y I_z - F_x I_y \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Si se expresa τ de manera compacta como $\tau = \mathbf{T}\mathbf{f}$ y se sustituye \mathbf{f} por la ecuación 2.9 el vector de fuerzas y momentos de control τ para el *Krick Felix* se puede definir de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{|n|n}|n|n \\ k_2\delta_T \\ k_2l_{xT}\delta_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Los valores de ganancias (b_1 , b_2 y b_3) solo pueden ser determinados mediante pruebas experimentales. Teniendo el *Krick Felix* dos entradas de control: la deflexión del timón y la fuerza de empuje, provocadas por el timón de cola y la hélice del barco respectivamente.

2.3. Modelo dinámico no lineal de 3 GDL para el *Krick Felix*

El modelo no lineal de 3 GDL constituye la representación más exacta del *Krick Felix*. En el mismo se incluyen los coeficientes relacionados con la dinámica del cuerpo rígido, las masas añadidas, el amortiguamiento y la dinámica de los actuadores. Sirve para obtener las características dinámicas de la embarcación, como son la estabilidad y maniobrabilidad, la robustez y las limitaciones de control que posee. Además permite evaluar el comportamiento del barco en situaciones excepcionales (Velasco, 2013; Balanza Llama, 2017).

La matriz de inercia incluyendo las masas añadidas del modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* se calcula como:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (2.12)$$

Quedando \mathbf{M} determinada como:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0,8163 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0076 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0464 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Por otra parte la matriz que incluye los términos de *Coriolis* y masas añadidas se define como:

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) \quad (2.14)$$

Quedando $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})$ como:

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & -0,8r & 0,2076v \\ 0,8r & 0 & -0,0163u \\ 0,2076v & -0,0163u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.4. Modelos linealizados

Las maniobras llevadas a cabo por la embarcación muchas veces son de gran dificultad, pero resulta poco práctico que estos sistemas operen con un sistema de control diseñado a partir de un modelo detallado de la embarcación. Por esta razón una alternativa consiste en un modelo matemático simplificado y desacoplado en varios subsistemas. De esta manera se sacrifica la exactitud en favor de la rapidez de simulación obtenida con el modelo, a mayor rapidez, las simulaciones tendrán mayor velocidad que las maniobras en tiempo real lo cual es especialmente importante para propósitos de predicción dinámica (Sutulo, 2002).

El modelo de 3 GDL mostrado anteriormente se puede desacoplar en varios subsistemas entre los cuales existe poca interacción. Esta descomposición es posible llevarla a cabo debido a las propiedades geométricas que caracterizan 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 (Balanza Llama, 2017):

- 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 .

Para obtener las ecuaciones lineales del movimiento, se parte de las expresiones desacopladas que describen el movimiento de avance, desplazamiento lateral y guiñada de la embarcación (Chavez, 2005).

$$\text{Velocidad : } X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2) \quad (2.16)$$

$$\text{Desplazamiento lateral : } Y = m(\dot{v} - ur + X_G \dot{r}) \quad (2.17)$$

$$\text{Guiñada : } N = I_z \dot{r} + mX_G(ur + \dot{v}) \quad (2.18)$$

Esto implica que suponiendo que la velocidad del barco u no varía y el empuje se mantiene constante, la primera ecuación (movimiento longitudinal) se puede desacoplar de las otras dos (movimiento transversal y guiñada).

2.4.1. Subsistema lateral

En el estudio de la maniobrabilidad de la embarcación por modelos lineales se supone que su velocidad se mantiene constante. Como el origen del sistema de coordenadas del barco *Krick Felix* se encuentra ubicado en el centro de gravedad el término Xg es igual a cero. Teniendo en cuenta estos elementos, las ecuaciones 2.17 y 2.18 pueden expresarse de manera lineal como:

$$Y = m(\dot{v} - u_0 r) \quad (2.19)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (2.20)$$

Por su parte, la relación de transformación cinemática correspondiente al término ψ teniendo en cuenta las condiciones de operación del vehículo, está definida por (Jalving, 1994):

$$\dot{\psi} = \frac{s\theta_0}{c\theta_0} q + \frac{c\phi_0}{c\theta_0} r \approx r \quad (2.21)$$

La dinámica lateral de la embarcación se puede representar mediante el modelo en espacio estado tomando la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} & \frac{mu_0}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_3}{I_z - N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.22)$$

A partir de este modelo es posible obtener la función de transferencia entre la velocidad angular de ψ del vehículo y el ángulo de deflexión del timón como:

$$\frac{r_s}{\delta_T(s)} = \frac{b_3}{(I_z - N_{\dot{r}})s - N_r} \quad (2.23)$$

Donde se define el término de ganancia como $K = \frac{b_3}{-N_r}$ y la constante de tiempo como $T = \frac{I_z - N_{\dot{r}}}{-N_r}$. Esta representación mediante función de transferencia se conoce

como modelo de *Nomoto* de primer orden (Fossen, 2011; Moreno, 2015). Este modelo tiene como principal ventaja su simplicidad y que sus parámetros pueden ser definidos directamente mediante datos experimentales (Moreno, 2013).

El modelo de primer orden de *Nomoto* fue obtenido a partir de datos experimentales en investigaciones anteriores y queda de la siguiente manera (Balanza Llama, 2017):

$$\frac{r_s}{\delta_T(s)} = \frac{0,0437}{0,1945s + 1} \quad (2.24)$$

Esta función de transferencia para el *Krick Felix* puede ser empleada para la simulación. En investigaciones anteriores se sintonizó un controlador tipo P con ganancia 10 a partir de este modelo con el fin de simular el comportamiento del algoritmo NLGL (Hernández, 2017b).

2.5. Ecuaciones para modelar las corrientes marinas

Las corrientes marinas se definen en el sistema de referencia inercial Oe , considerándose constantes, irrotacionales y acotadas (Caharija, 2012). Cuando se le agregan las corrientes marinas al modelo, su ecuación queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r = \boldsymbol{\tau} \quad (2.25)$$

Para vehículos marinos quedan definidas por el vector $\mathbf{V}_c = [V_x, V_y, V_z]^T$, presentando un valor constante V_{max} , tal que $V_{max} \geq \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$.

La velocidad de las corrientes marinas de un fluido irrotacional se puede representar en el sistema de referencia del vehículo como:

$$\mathbf{v}_c = [u_c, v_c, 0, 0, 0, 0]^T, \quad (2.26)$$

donde u_c y v_c representan las componentes lineales de la velocidad de las corrientes.

El efecto de las corrientes marinas es añadido al modelo no lineal de 3 GDL del vehículo mediante el término \mathbf{v}_r (velocidad relativa). La velocidad relativa se define en el sistema de referencia Ob como:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c, \quad (2.27)$$

siendo \mathbf{v} el vector velocidad del vehículo.

El vector \mathbf{v}_c se relaciona con \mathbf{V}_c mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^T \mathbf{V}_c, \quad (2.28)$$

donde $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ representa la matriz de traslación de Ob a Oe utilizando los ángulos de *Euler*.

La magnitud de las corrientes se denota como V_{ca} . La dirección de las mismas, respecto al movimiento de la embarcación, es expresada en función de dos ángulos: el ángulo de dirección vertical (α_c) y el ángulo de dirección lateral (β_c). Para esta investigación resulta de interés obtener un modelo bidimensional de las corrientes, modificando la estructura del vector \mathbf{v}_c por lo que únicamente cuenta con las componentes (u_c, v_c), considerando que $\alpha_c = 0$. De manera que las ecuaciones para determinar los términos de \mathbf{v}_c quedan en función de V_{ca} y de β_c (Fossen, 2011):

$$\mathbf{V}_c = \begin{bmatrix} V_{ca} \cos(\beta_c) \\ V_{ca} \sin(\beta_c) \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Las componentes de velocidad de las corrientes referidas a Ob se calculan mediante la ecuación 2.28:

$$u_c = V_{ca} \cos(\beta_c - \psi), \quad v_c = V_{ca} \sin(\beta_c - \psi), \quad (2.30)$$

con $V_{ca} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$.

El modelo para corrientes marinas constantes e irrotacionales constituye una buena aproximación cuando se implementa un sistema de control a bordo de la embarcación. La utilización de este tipo de modelo es crucial a la hora de seleccionar los objetivos de control así como para el diseño de algoritmos de guiado.

2.6. Comportamiento del modelo no lineal de 3 GDL

El modelo no lineal de 3 GDL se utiliza para simular en el dominio del tiempo los movimientos de la embarcación durante el seguimiento de diferentes trayectorias. En la Figura 2–2 se presenta el esquema para la implementación del modelo en *Matlab*, de acuerdo a la ecuación 2.25.

Las entradas de este modelo son la velocidad de giro del motor y las deflexiones angulares que se producen. En este apartado se muestran los resultados simulados cuando el vehículo navega sin presencia de perturbaciones y cuando es afectado por las corrientes marinas con el fin de evidenciar los efectos que pueden provocar las mismas a la hora del seguimiento de una ruta.

En esta simulación se muestran el modelo simulado con y sin corrientes marinas. El motor del vehículo gira con una velocidad constante y con una deflexión del timón fija, por lo que debe seguir una trayectoria circular perfecta en caso de no verse afectado

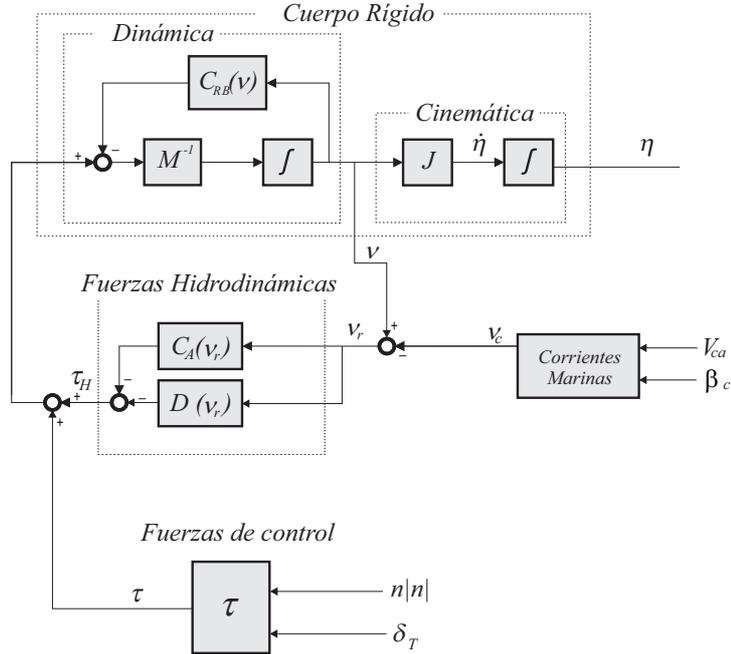


Figura 2-2: Esquema general para el modelo dinámico no lineal de 3 GDL del *Krick Felix*

por fuerzas externas. Para la simulación de esta trayectoria se fijaron los valores de velocidad de giro del motor en 600 [rpm] y la deflexión del timón en 0.1 [rad].

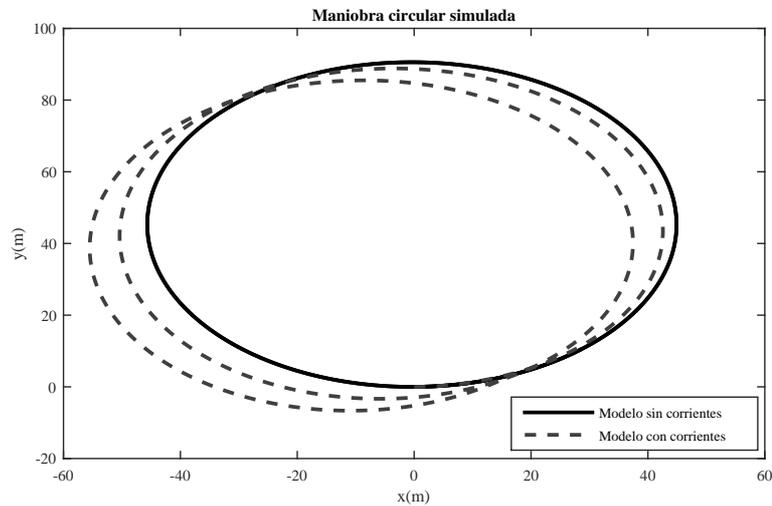


Figura 2-3: Comportamiento del modelo

En la Figura 2-3 se presentan las dos curvas simuladas. Cuando el vehículo no está bajo el efecto de perturbaciones sigue la trayectoria formando una circunferencia mientras que cuando está bajo la influencia de las corrientes marinas experimenta una desviación respecto al camino original. Precisamente, lograr la corrección de esa desviación constituye el objetivo fundamental que persigue el algoritmo de guiado que se propone en este trabajo. Para la simulación de las corrientes marinas se usó una velocidad con valor $V_{ca} = 0.07$ [m/s] y $\beta_c = 10^\circ$.

2.7. Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se describe el modelo matemático del bote *Krick Felix*, utilizando los postulados de Newton para derivar las ecuaciones dinámicas no lineales de su movimiento en los 3 GDL. Las ecuaciones cinemáticas se representan mediante los ángulos de *Euler*.

El modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* se utiliza para evaluar mediante simulación el desempeño del vehículo durante el seguimiento de caminos rectos.

La incorporación de una representación matemática de las corrientes marinas en el modelo no lineal del *Krick Felix*, contribuye a garantizar mejores resultados en el desempeño de los sistemas de guiado y control. Las desviaciones causadas por las corrientes marinas, que se aprecian en las pruebas de simulación realizadas con el modelo, deben ser corregidas por el esquema de guiado NLGL.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y RECHAZO DE PERTURBACIONES DEL ALGORITMO DE GUIADO NLGL

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen las ecuaciones que sustentan el algoritmo de guiado NLGL y su linealización para el caso de caminos rectos. Se hace un análisis de rechazo de perturbaciones del algoritmo de manera analítica a partir del esquema de guiado propuesto en esta investigación. Además se realiza un análisis de estabilidad por el segundo método de Lyapunov.

3.2. Algoritmo de guiado NLGL

El algoritmo de guiado NLGL se basa en escoger un punto de referencia en la trayectoria deseada y a partir de este generar un comando de aceleración lateral (Park, 2007). En la Figura 3-1 se muestra como el punto de referencia se encuentra a una distancia L_1 hacia adelante del vehículo (Hernández Morales, 2016).

En la Tabla 3-1 se presentan las variables que intervienen en el algoritmo:

Tabla 3-1: Variables del algoritmo NLGL para caminos rectos

Notación	Significado
U	Módulo de la velocidad del vehículo
L_1	Distancia que separa la posición del vehículo del punto de referencia situado en la trayectoria de vuelo.
ρ	Ángulo comprendido entre U y la distancia L_1
$a_{s_{cmd}}$	Comando de aceleración lateral
d	Error perpendicular al camino
R	Radio del círculo virtual

El comando de aceleración lateral es el encargado de que el vehículo converja a la trayectoria deseada, a medida que va disminuyendo el error también disminuye la aceleración, llegando al punto de ser cero. Esta acción de mando permite que el vehículo siga el camino deseado.

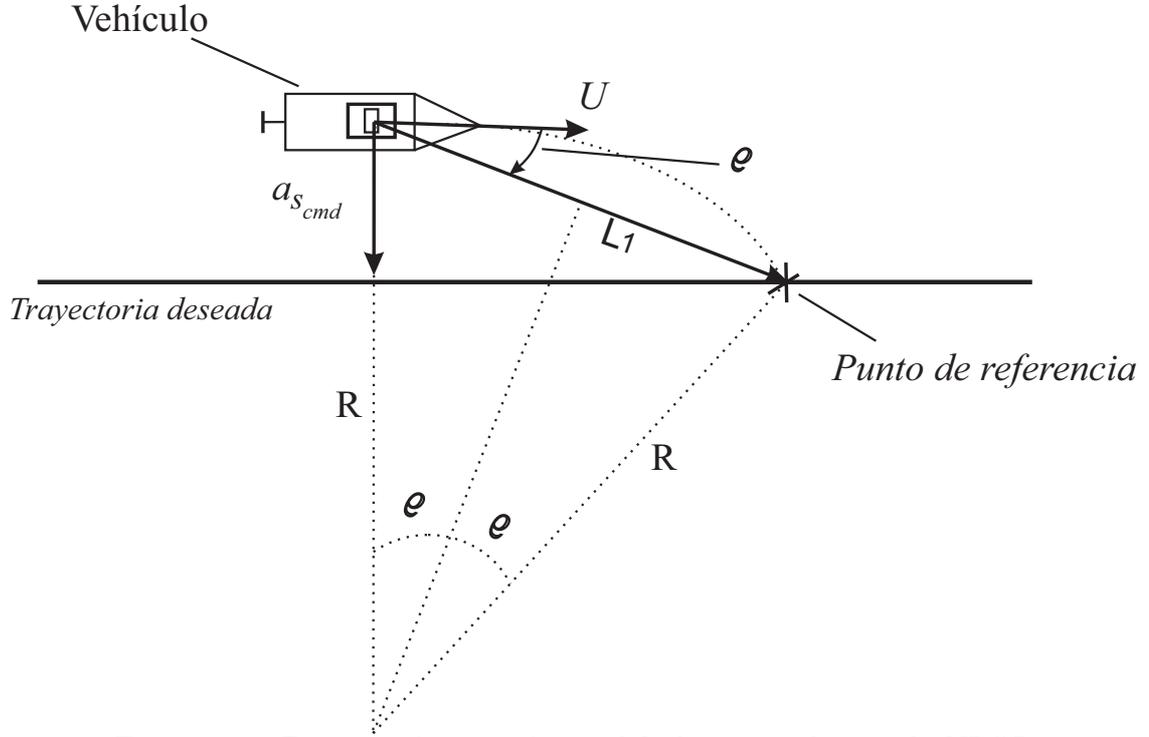


Figura 3-1: Descripción geométrica del algoritmo de guiado NLGL

Este comando no es más que la aceleración centrípeta necesaria para seguir el camino circular de radio R definido por la posición del punto de referencia, la posición del vehículo y tangencialmente al vector de velocidad del vehículo como se muestra en la Figura 3-1.

La aceleración lateral queda definida como:

$$a_{cen} = \frac{U^2}{R} \quad (3.1)$$

Como se aprecia en la Figura 3-1 existe una relación entre la distancia L_1 y R la cual queda expresada geométricamente de la siguiente forma:

$$L_1 = 2R \sin \rho \quad (3.2)$$

Por lo cual sustituyendo 3.2 en 3.1 se obtiene:

$$a_{cen} = \frac{U^2}{R} = 2 \frac{U^2}{L_1} \sin \rho = a_{s_{cmd}} \quad (3.3)$$

Y el comando de aceleración lateral está determinado por:

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{U^2}{L_1} \sin \varrho \quad (3.4)$$

De la ecuación 3.4 es importante observar que la dirección de la aceleración depende del signo del ángulo entre la distancia L_1 y U . Además se puede apreciar que cuando el vehículo esté alejado del camino, el ángulo ϱ será de mayor amplitud por lo que la aceleración tendrá un valor elevado, pero cuando el vehículo se encuentre sobre la línea del camino este ángulo tendrá valor cero por lo que no existirá aceleración lateral, de esta manera el algoritmo logra que el vehículo siga la trayectoria deseada.

Para determinar el valor del comando $a_{s_{cmd}}$ es necesario conocer el valor de U , para ello se utiliza la ecuación:

$$\sqrt{u^2 + v^2} = U \quad (3.5)$$

Donde u y v corresponden a las velocidades del modelo de 3 GDL *Krick Felix* en el plano horizontal.

Con el fin de implementar este algoritmo en embarcaciones marinas es necesario vincular su salida con algún parámetro que corresponda con el modelo del barco. Como la variable $a_{s_{cmd}}$ no se corresponde con ninguno de los parámetros de entrada del modelo del *Krick Felix* resulta necesario asociarla con alguno de sus estados. Teniendo en cuenta la ecuación 3.1 y sabiendo que existe una relación entre la velocidad angular y la velocidad lineal dada por:

$$U = r \cdot R \quad (3.6)$$

Se obtiene una expresión que relaciona a la velocidad de giro deseada en el movimiento de guiñada con la $a_{s_{cmd}}$:

$$r_d = \frac{a_{s_{cmd}}}{U} \quad (3.7)$$

De esta manera, a partir del comando de aceleración lateral generado por el algoritmo, resulta posible definir el valor necesario de velocidad angular r , para que el vehículo sea capaz de seguir un camino previamente definido.

3.2.1. Linealización del algoritmo

La linealización de este algoritmo cobra sentido cuando se pretende seguir un camino recto. Cuando el vehículo se encuentra cerca de la trayectoria a seguir el valor del ángulo ϱ es pequeño y a pequeñas variaciones del mismo se puede utilizar la aproximación lineal:

$$\sin \varrho \approx \varrho = \varrho_1 + \varrho_2 \quad (3.8)$$

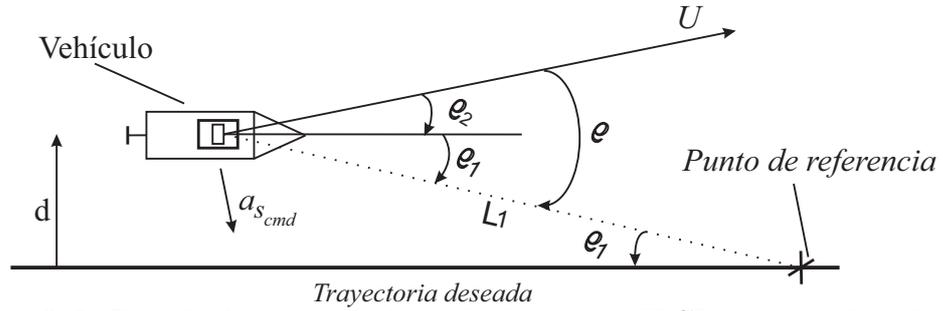


Figura 3–2: Descripción geométrica del algoritmo NLGL para su linealización
De la Figura 3–2 se puede concluir que:

$$\sin \varrho_1 \approx \varrho_1 \approx \frac{d}{L_1} \quad (3.9)$$

$$\sin \varrho_2 \approx \varrho_2 \approx \frac{\dot{d}}{U} \quad (3.10)$$

Combinando las ecuaciones anteriores con la 3.4 se llega a:

$$a_{s_cmd} = 2 \frac{U^2}{L_1} \sin \varrho \approx 2 \frac{U}{L_1} (\dot{d} + \frac{U}{L_1} d) \quad (3.11)$$

La linealización presentada hace que el algoritmo se comporte como un controlador PD que actúa sobre el error perpendicular al camino. Como se puede apreciar en la ecuación 3.11, las ganancias proporcional y derivativa del controlador dependen del valor del módulo de la velocidad del vehículo (U) y de la distancia L_1 .

3.3. Análisis del rechazo a perturbaciones del esquema de guiado propuesto

Durante el cumplimiento de las misiones los vehículos marinos están expuestos a factores externos que atentan contra los objetivos propuestos inicialmente por los operadores. Entre estos se encuentran las perturbaciones medioambientales. Para el caso de los *USV* las corrientes marinas son muchas veces la causa de una desviación en la trayectoria deseada. Para contrarrestar este efecto es necesario contar con un algoritmo de guiado que logre reducir el error provocado a la mínima expresión. De ahí la importancia de

contar con un análisis de rechazo a perturbaciones que garantice el buen comportamiento del algoritmo utilizado. En la Figura 3–3 se muestra la estructura del esquema de guiado que se propone en esta investigación. Es un lazo de control en cascada que tiene como entrada de referencia la posición del vehículo, el error es la entrada al algoritmo de guiado que a su vez da la referencia al lazo de control de r .

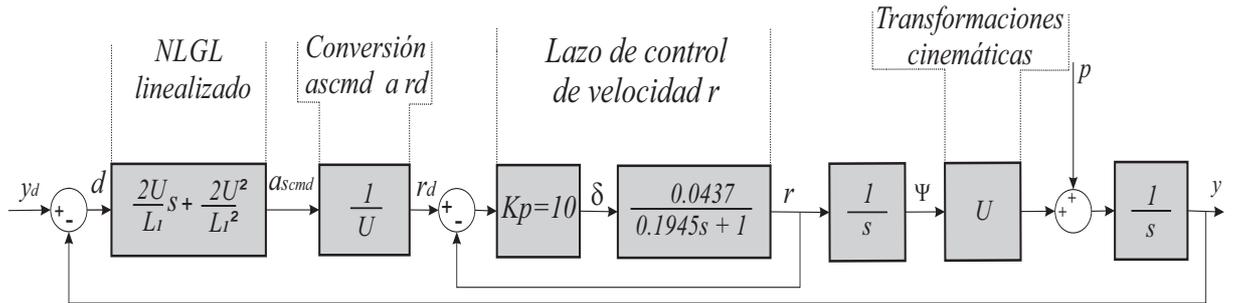


Figura 3–3: Diagrama en bloques del esquema de guiado

Se utiliza un controlador tipo P de ganancia 10 para el lazo interno de control de r , este fue obtenido en investigaciones anteriores realizadas por el grupo con esta embarcación (Hernández, 2017b). Se utiliza el modelo de primer orden de *Nomoto* presentado en la sección 2.4

El bloque que corresponde al NLGL linealizado presenta una estructura similar a un controlador PD. Los pasos con los cuales se llegan al mismo están demostrados en la sección 3.2.

El bloque correspondiente a $1/U$ se utiliza para convertir el comando de aceleración lateral a rd que es la entrada de referencia al lazo de control de velocidad de r y se relacionan por la ecuación 3.7 (Hernández, 2017b).

El bloque de las transformaciones cinemáticas es el encargado de convertir la velocidad en el vehículo en el sistema del barco a la velocidad en el sistema de referencia inercial. Asumiendo que el camino está construido por líneas rectas, tal que la trayectoria deseada esté dada por $xd = x$ y $yd = 0$, implica que cuando el vehículo se mueve a través del camino los valores de v y ψ van a ser pequeños Fossen (2002).

Si se tiene en cuenta que $v \approx 0$ y $\psi \approx 0$, la ecuación cinemática para y queda reducida a:

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \approx U \psi \quad (3.12)$$

El error en un lazo de control viene dado por la diferencia entre el valor de referencia y la variable medida como se muestra en la ecuación 3.13:

$$E_{ss} = y_{dss} - y_{ss} \quad (3.13)$$

Si se considera que no existen variaciones alrededor de la entrada de referencia del lazo de control, siendo este un sistema lineal, se puede aplicar el principio de superposición, por lo que el error ante una entrada perturbadora es prácticamente todo lo que se ve a la salida del lazo de control.

$$E_{ss} = -y_{ss} \quad (3.14)$$

Para demostrar que el esquema mostrado en la Figura 3-3 logra rechazar el efecto de las perturbaciones, se empleó el teorema del valor final (Ogata, 2002), que se sustenta en la ecuación 3.15. Considerando que la perturbación se comporta como un paso unitario.

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) \quad (3.15)$$

En este punto podemos plantear la ecuación del error para este diagrama en bloques representada de la siguiente manera:

$$y_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sy(s) \quad (3.16)$$

quedando:

$$y_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0,1945s^2 + 1,437s}{0,1945s^3 + 1,437s^2 + 0,874\frac{U}{L_1}s + 0,874\frac{U^2}{L_1^2}} = 0 \quad (3.17)$$

Con esto se demuestra que el esquema de guiado aplicado al *Krick Felix* es capaz de rechazar las perturbaciones, en este caso las corrientes marinas. El desarrollo matemático completo está disponible en el Anexo A.

3.4. Análisis de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL

Para los sistemas no lineales o variantes en el tiempo resulta muy difícil realizar un análisis de estabilidad, en ocasiones se hace imposible. El segundo método de *Lyapunov* se aplica en estos casos donde los otros métodos fracasan. No obstante a pesar de ser un método muy poderoso no es sencillo de determinar para modelos de gran complejidad por lo que la experiencia cumple un papel importante (Ogata, 2002).

Mediante el segundo método de *Lyapunov* se determina la estabilidad de un sistema sin resolver las ecuaciones de estado, lo que significa una gran ventaja, pues generalmente resulta muy difícil despejar las ecuaciones de estado no lineales.

La teoría de estabilidad de *Lyapunov* tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento de sistemas dinámicos descritos por ecuaciones diferenciales de la forma:

$$\dot{x} = f(t, x(t)) \quad x(0) \in \mathbb{R}^n \quad \forall \quad t \geq 0. \quad (3.18)$$

donde el vector $x(t) \in \mathbb{R}^n$ se refiere al estado del sistema dinámico representado por 3.18 y $x(0) \in \mathbb{R}^n$ se denomina estado inicial o condición inicial.

Entre los conceptos básicos de la teoría de *Lyapunov* destacan los siguientes: equilibrio, estabilidad, estabilidad asintótica y estabilidad exponencial. A continuación se expondrán los que emplearemos más adelante para el análisis de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL. Las mismas fueron tomadas del libro Control de Movimiento de Robots Manipuladores así como el teorema utilizado (Kelly, 2003).

3.4.1. Definiciones

Equilibrio.

Un vector constante $x \in \mathbb{R}^n$ es un estado de equilibrio del sistema 3.18 si

$$f(t, x_e) = 0 \quad \forall \quad t \geq 0. \quad (3.19)$$

Estabilidad.

El origen $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ es un equilibrio estable de la ecuación 3.18 si para cada número $\varepsilon > 0$ se puede encontrar un número $\delta > 0$, tal que:

$$\|x(0)\| < \delta \quad \implies \quad \|x(t)\| < \varepsilon \quad \forall \quad t \geq 0. \quad (3.20)$$

Estabilidad asintótica.

El origen $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ es un equilibrio asintóticamente estable de 3.18 si:

- El origen es estable.
- EL origen es atractivo, es decir, existe un número $\delta' > 0$ tal que:

$$\|x(0)\| < \delta' \quad \implies \quad \|x(t)\| \longrightarrow 0 \quad \text{cuando} \quad t \longrightarrow \infty$$

Estabilidad asintótica global.

El origen $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ es un equilibrio asintóticamente estable en forma global de 3.18 si:

- El origen es estable.
- EL origen es atractivo globalmente, es decir:

$$\|x(t)\| \longrightarrow 0 \quad \text{cuando} \quad t \longrightarrow \infty, \quad \forall x(0) \in \mathbb{R}^n$$

De la definición anterior cabe destacar que un equilibrio asintóticamente estable de forma global es un equilibrio asintóticamente estable, pero a la inversa no se cumple.

3.4.2. Función definida positiva localmente y función definida positiva

Una función continua $W: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}_+$ es una función definida positiva localmente si:

- $W(0) = 0$.
- $W(x) > 0$ para todo $x \neq 0$ pero con $\|x\|$ pequeña.

Una función continua $W: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}_+$ es una función definida positiva si:

- $W(0) = 0$.
- $W(x) > 0 \quad \forall x \neq 0$.

3.4.3. Segundo método de *Lyapunov*

Dadas las definiciones anteriores se puede exponer el segundo método de *Lyapunov* para el análisis de estabilidad. Cabe destacar que una función candidata de *Lyapunov* debe tener derivadas parciales continuas.

Teorema 3.1. *El origen $x = 0 \in \mathbb{R}^n$ es un estado de equilibrio estable de la ecuación 3.18, si existe una función candidata de Lyapunov $V(t, x)$, tal que su derivada temporal satisfaga:*

$$\dot{V}(t, x) \leq 0, \quad \forall t \geq 0 \quad \text{al menos para } \|x\| \text{ pequeña.}$$

3.5. Estabilidad del algoritmo de guiado NLGL.

En consecuencia con las definiciones y los teoremas descritos anteriormente se procede a realizar el análisis de estabilidad del algoritmo de guiado NLGL. Para el análisis de estabilidad del algoritmo durante el seguimiento de caminos rectos se tomaron variables de estado que coinciden con las utilizadas en un artículo del autor del algoritmo NLGL, al igual que la candidata de *Lyapunov* (Park, 2007):

$$\dot{d} = V \sin \varrho_2 \tag{3.21}$$

$$\dot{\varrho}_2 = -\frac{a_{s_{cmd}}}{V} \tag{3.22}$$

a partir de la Figura 3-2 se obtiene la siguiente relación:

$$\sin(\varrho - \varrho_2) = \frac{d}{L_1} \quad (3.23)$$

La función de *Lyapunov* propuesta, cumpliendo con los requisitos expuestos en 3.4.2 es:

$$L = \frac{1}{2}V^2 \sin^2 \varrho_2 + \frac{V^2}{L_1^2}d^2 \quad (3.24)$$

Procediendo como se describe en 3.4.3 la derivada queda de la siguiente manera:

$$\dot{L} = V^2 \sin \varrho_2 \cos \varrho_2 \dot{\varrho}_2 + 2\frac{V^2}{L_1^2}d\dot{d} \quad (3.25)$$

Con el fin de demostrar que la derivada de la ecuación 3.25 es definida negativa, se procede a realizar una serie de pasos: primeramente se sustituye $\dot{\varrho}_2$ y \dot{d} en la ecuación 3.25 y se obtiene como resultado:

$$\dot{L} = V^2 \sin \varrho_2 \cos \varrho_2 \left(-\frac{2V}{L_1} \sin \varrho\right) + 2\frac{V^2}{L_1^2}V \sin \varrho_2 L_1 \sin(\varrho - \varrho_2) \quad (3.26)$$

Simplificando y agrupando términos semejantes la ecuación 3.26 queda:

$$\dot{L} = -2\frac{V^3}{L_1} \sin \varrho_2 (\cos \varrho_2 \sin \varrho - \sin(\varrho - \varrho_2)) \quad (3.27)$$

Por último, usando la identidad

$$\sin(\varrho - \varrho_2) = \sin \varrho \cos \varrho_2 - \cos \varrho \sin \varrho_2 \quad (3.28)$$

La función de *Lyapunov* queda reducida a:

$$\dot{L} = -2\frac{V^3}{L_1} \sin^2 \varrho_2 \cos \varrho \quad (3.29)$$

Siendo esta semi-definida negativa para los rangos de las variable de estado para:

$$d < L_1$$

$$\frac{-\pi}{2} < \varrho < \frac{\pi}{2}$$

Podemos concluir que el algoritmo NLGL durante el seguimiento de caminos rectos, para las condiciones anteriores, es asintóticamente estable según lo expresado en el Teorema 3.1.

3.6. Consideraciones finales del capítulo

La estructura del esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL es capaz de rechazar el efecto de las perturbaciones medioambientales durante el seguimiento de caminos rectos. Esto se demuestra de manera analítica utilizando aspectos esenciales de la teoría de control.

El algoritmo de guiado NLGL presenta estabilidad asintótica lo cual se demostró por el segundo método de *Lyapunov*.

CAPÍTULO 4

AJUSTE Y DESEMPEÑO DEL ALGORITMO NLGL

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas simuladas del algoritmo de guiado NLGL aplicado al *Krick Felix* durante el seguimiento de un camino formado por dos puntos en un primer momento. Luego se simula una trayectoria de mayor complejidad conformada por varios tramos rectos y se analiza el comportamiento del error. Además se exponen pruebas reales realizadas con el *Krick Felix* para validar los resultados de las simulaciones.

4.2. Resultado de las simulaciones

En la Figura 4-1 se presenta el esquema de sistema de control de movimiento que se utiliza en esta investigación para lograr un buen desempeño durante el seguimiento de caminos por parte del bote robótico *Krick Felix*.

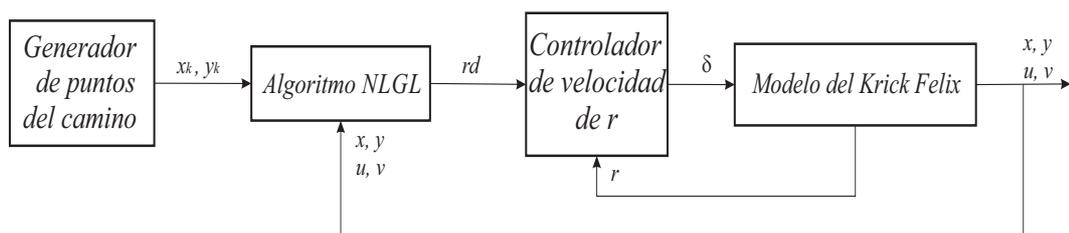


Figura 4-1: Diagrama en bloques del sistema de control de movimiento

El bloque generador de puntos del camino, llamados *Waypoints*(Wp) es el encargado de generar la misión a seguir. El algoritmo de guiado NLGL le da la referencia al lazo de control de velocidad de r , ambos son los encargados de lograr que el vehículo siga un camino sin restricciones temporales con la mayor precisión posible. El modelo de 3 GDL del *Krick Felix*, que incluye el efecto de las corrientes marinas se utiliza en las pruebas de simulación donde se evalúa el comportamiento del algoritmo NLGL.

4.2.1. Evaluación de un camino formado por dos puntos

En este trabajo se utiliza un controlador tipo P de ganancia 10, el cual fue abordado en la sección 3.3 con el fin de seguir la referencia dada por el algoritmo NLGL, y que de esta manera el vehículo converja y pueda seguir con precisión un camino recto. Este se utilizará en todas las simulaciones con el fin de evaluar el comportamiento del algoritmo de guiado NLGL.

El algoritmo está implementado en *Arduino* y los parámetros de configuración del mismo se definen por el software *Mission Planner*. Este recibe como argumento dos valores que son: T y φ , el primero representa un período y el segundo un factor de amortiguamiento. Ambos se utilizan para el cálculo de la distancia L_1 y se relacionan según la siguiente ecuación (Hernández Morales, 2016):

$$L_1 = \frac{\varphi \cdot T \cdot U}{\pi} \quad (4.1)$$

Es importante destacar que no existe un ambiente para vehículos marinos implementado en *Arduino*, por lo que para la realización de estas pruebas se utiliza el de vehículo terrestre que con unas pequeñas variaciones puede ser utilizado en este caso. Para este trabajo se establecen los parámetros de configuración en $T = 8$ y $\varphi = 0.75$, los cuales coinciden con los recomendados para llevar a cabo las misiones con vehículos terrestres (ArduPilot, 2016).

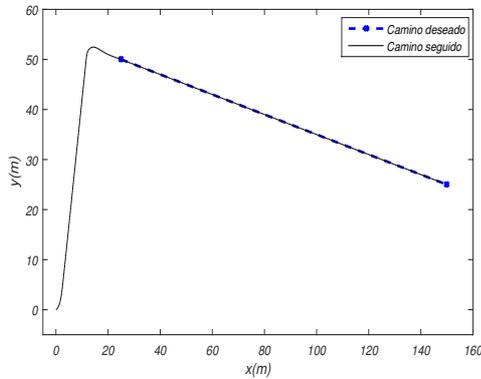
La posición inicial del vehículo es el punto $(0, 0)$ y el radio del círculo de aceptación para considerar un punto vencido es de 0.5 [m]. Las simulaciones se realizan en el software *MATLAB*. En la primera prueba se pretende que el vehículo siga una trayectoria formada por dos puntos localizados en $p_1 = (25, 50)$ y $p_2 = (150, 25)$. La velocidad de giro del motor es de 600 [rpm].

En la Figura 4-2(a) se muestra como el vehículo es capaz de cumplir la misión siendo afectado por una corriente de magnitud constante: $V_{ca} = 0.07$ [m/s] y $\beta_c = 10^\circ$, partiendo de una posición distante al punto inicial. En la Figura 4-2(b) se ve como la acción del algoritmo de guiado hace que el error de seguimiento tienda a cero rápidamente.

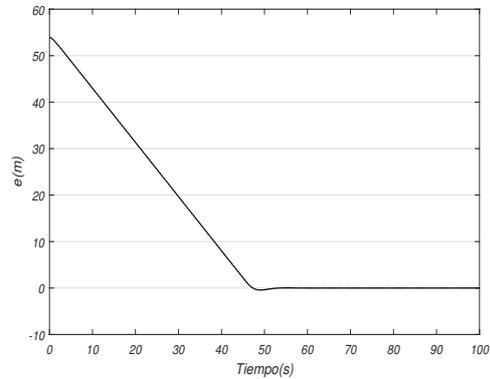
4.2.2. Evaluación de un camino formado por varios tramos rectos

En la siguiente prueba simulada se pretende analizar el comportamiento del vehículo en una trayectoria más compleja. Los puntos para la misión se muestran en la Tabla 4-1. La simulación se realiza bajo las mismas condiciones que la prueba anterior.

Como se puede observar en la Figura 4-3(a), el bote robótico *Krick Felix* es capaz de seguir satisfactoriamente los segmentos de rectas definidos por los puntos del camino,



(a) Seguimiento del camino con corrientes



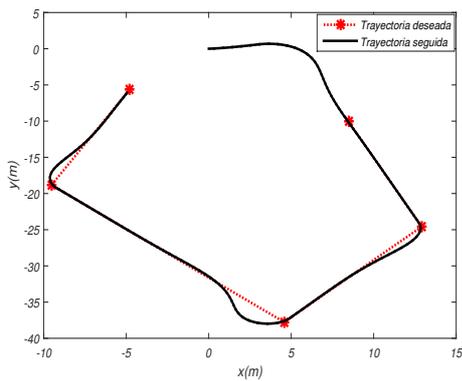
(b) Error de seguimiento

Figura 4–2: Seguimiento de un camino formado por dos puntos por parte del bote robótico *Krick Felix*

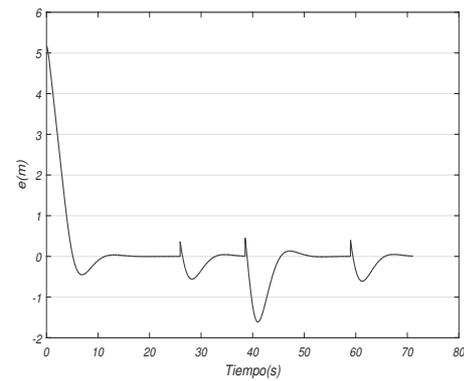
Tabla 4–1: Puntos del camino

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
x(m)	8.482	12.90	4.570	-9.532	-4.797
y(m)	-10.07	-24.58	-37.76	-18.82	-5.647

convergiendo rápidamente a la trayectoria deseada. En la Figura 4–3(b) se puede apreciar como el error tiende a cero, los picos ocurren en los lugares donde la trayectoria cambia bruscamente.



(a) Seguimiento del camino



(b) Error de seguimiento

Figura 4–3: Seguimiento de un camino formado por varios tramos rectos por parte del bote robótico *Krick Felix*

Los resultado de estas simulaciones demuestran que el algoritmo de guiado NLGL es capaz de cumplir los objetivos relacionados con el escenario de seguimiento de caminos sin restricciones temporales.

4.3. Pruebas Reales

Para validar los resultados de las simulaciones se realizaron pruebas experimentales con el bote robótico *Krick Felix*. Las mismas se llevaron a cabo en una laguna ubicada cerca del campo universitario. En la Figura 4-4 se muestra la pantalla *Flight Plan*, en el ambiente de vehículos terrestres, del software *Mission Planner*. En esta se puede apreciar como queda conformada la trayectoria a seguir.

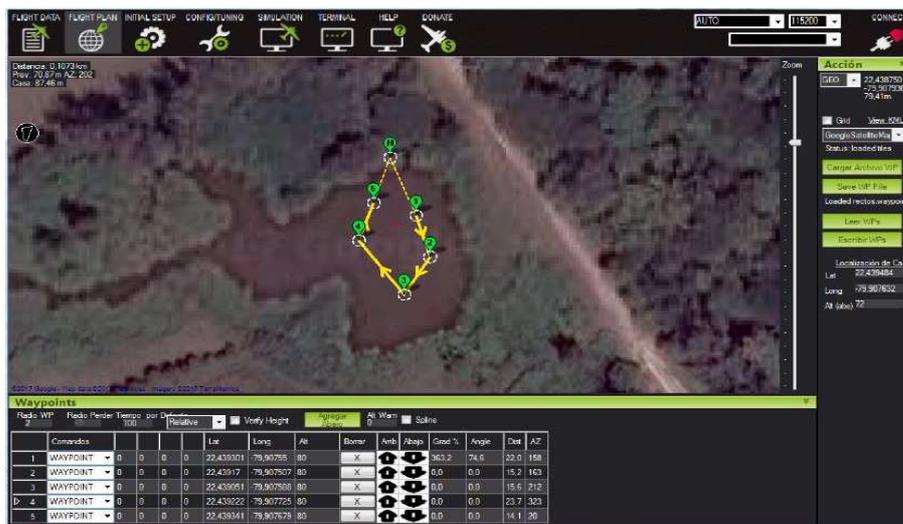


Figura 4-4: Planificación de la misión

En la Figura 4-5 se muestra la pantalla de configuración de *Mission Planner* donde se ajustaron los parámetros del algoritmo de guiado NLGL para realizar las pruebas reales. Como se puede apreciar son los mismos valores utilizados en las pruebas simuladas.



Figura 4-5: Parámetros de configuración del algoritmo de guiado NLGL

En la Figura 4–6 se muestra como el vehículo sigue la trayectoria deseada, a pesar de las perturbaciones provocadas. Con estas pruebas reales se validan los resultados obtenidos durante la simulación, se demuestra la fiabilidad del algoritmo y se ratifica su factibilidad de emplearlo en vehículos marinos brindando buenos resultados.

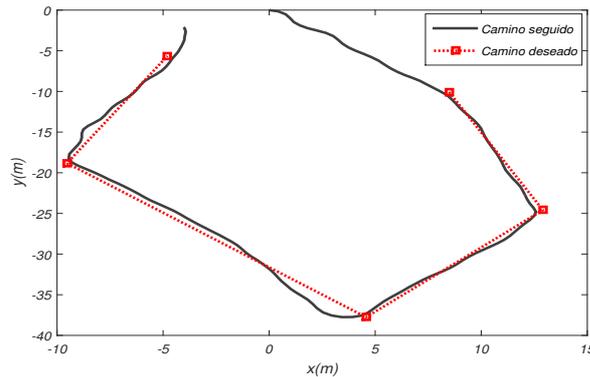


Figura 4–6: Resultados experimentales obtenidos durante el seguimiento de un camino

4.4. Análisis económico y medioambiental

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el bote robótico *Krick Felix* que fue adquirido por el GARP recientemente. Su costo se estima en unos 105 USD aproximadamente. Los componentes electrónicos y sensoriales del vehículo son de bajo costo y sus valores aproximados no superan los 100 USD. Sumando todo el equipamiento se tiene un precio razonable considerando que un autopiloto comercial sobrepasa fácilmente los mil dólares. Hoy en día el uso de los vehículos no tripulados ha tomado cada vez más fuerza y brinda muchas ventajas. Un ejemplo de ello sería usar estos vehículos para la exploración de las zonas de pesca existentes alrededor de nuestro país. Su utilización supondría un ahorro en cuanto a recursos humanos y financieros al no tener que enviar una tripulación y barcos que consuman una cantidad mayor de combustible a realizar esa operación. Facilitaría el reconocimiento de los lugares más propensos para el comienzo de la temporada pesquera en nuestro archipiélago, dotándola de análisis estadísticos a partir de la gama de sensores que puedan tener a bordo los vehículos marinos no tripulados. Desde el punto de vista medioambiental su uso sería muy amplio, pudiendo realizar estudios en el ecosistema marino con la toma de muestras para su posterior análisis y llegando a zonas de muy difícil acceso, lo que sería de gran ayuda para conservar y proteger la fauna marina. Por estas razones es necesario que se sigan desarrollando investigaciones de este tipo con el fin de profundizar en el campo de los vehículos no tripulados que en un futuro muy cercano podrían dotar al país de herramientas que traerían consigo un impacto positivo en nuestra economía.

4.5. Consideraciones finales del capítulo

El esquema de guiado basado en el algoritmo de guiado NLGL asegura la convergencia y precisión durante el seguimiento de caminos rectos garantizando cero error ante la influencia de corrientes marinas, lo cual queda demostrado a partir de los resultados de las pruebas simuladas y reales.

Los resultados obtenidos mediante simulación avalan la utilización del modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* para la evaluación de algoritmos de guiado y control en el vehículo.

La realización de pruebas experimentales con el bote *Krick Felix*, utilizando la implementación del algoritmo NLGL en *Arduino*, demuestran la factibilidad del uso de esta tecnología en vehículos marinos.

CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados en esta investigación, se ha logrado demostrar la estabilidad y el rechazo a perturbaciones del algoritmo de guiado NLGL para el caso de caminos rectos. A partir de estos resultados, se plantean las conclusiones generales siguientes:

- Teniendo en cuenta los estudios realizados en la literatura especializada, se establece que un esquema de guiado basado en el algoritmo de guiado NLGL es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de caminos rectos, en presencia de perturbaciones medioambientales, para el caso de un vehículo marino.
- El esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL es capaz de rechazar el efecto de las perturbaciones medioambientales y asegurar estabilidad asintótica durante el seguimiento de caminos rectos, lo cual ha sido demostrado de manera analítica utilizando postulados de la teoría de control y el segundo método de *Lyapunov*, respectivamente.
- La implementación en *Arduino* del algoritmo de guiado NLGL resulta factible para el seguimiento de caminos rectos por parte de vehículos marinos, lo cual queda demostrado en este trabajo a partir de la realización de pruebas experimentales exitosas con el bote *Krick Felix*.
- A partir de las simulaciones y pruebas experimentales realizadas se comprobó que el esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL garantiza convergencia y precisión durante el seguimiento de caminos rectos con el bote robótico *Krick Felix*.

RECOMENDACIONES

- Evaluar la posibilidad de procesar las variables realimentadas a los bloques de guiado y control con algún algoritmo de filtrado para lograr una mejoría en el desempeño del esquema de guiado propuesto en esta investigación.
- Evaluar mediante simulación y pruebas experimentales el seguimiento de caminos curvos del esquema de guiado NLGL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allotta, B.; Costanzi, R.; Ridolfi A.; Colombo C.; Bellavia F.; Fanfani M.; Pazzaglia F.; Salvetti O.; Moroni D.; Pascali M. (2015). The arrows project: adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology. *IFAC-PapersOnLine* **48**(2), 194–199.
- ArduPilot (2016). Mission planner overview. Página web: planner.ardupilot.com: (acceso marzo 2018).
- Balanza Llama, C. (2017). Modelado dinámico del barco de pequeño porte Krick Felix. PhD thesis. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- Bingham, B.; Foley, B.; Singh H. Camilli R.; Delaporta K.; Eustice R.; Mallios A.; Mindell D.; Roman C.; Sakellariou D. (2010). Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle. *Journal of Field Robotics* **27**(6), 1–16.
- Breivik, M. (2010). Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles. Tesis doctoral. NTNU.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles, pp. 51–76. InTech. Vienna, Austria.
- Caccia, M.; Bruzzone, G.; Spirandelli E.; Veruggio G.; Stortini AM.; Capodaglio G. (2005). Sampling sea surfaces with sesamo: an autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE robotics & automation magazine* **12**(3), 95–105.
- Caharija, W.; Pettersen, K. Y.; Bibuli M. Calado P.; Zereik E.; Braga J.; Gravdahl J. T.; Sørensen A. J. Milovanović M.; Bruzzone G. (2016). Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **24**(5), 1623–1642.
- Caharija, W.; Pettersen, K. Y.; Gravdahl J.T.; Børhaug E. (2012). Path following of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of ocean currents. In: *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*. IEEE. pp. 528–535.
- Caharija, W.; Pettersen, K.Y.; Calado P.; Braga J. (2015). A comparison between the ilos guidance and the vector field guidance. *IFAC-PapersOnLine* **48**(16), 89–94.
- 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.
- Curry, R.; Lizarraga, M.; Mairs B.; Elkaim G.H. (2013). L+ 2, an improved line of sight guidance law for uavs. In: *American Control Conference (ACC), 2013*. IEEE. pp. 1–6.
- 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.
- Garus, J. (2016). Nonlinear control of underwater robotic vehicle in plane motion. *Scientific Journal of Polish Naval Academy* **206**(3), 15–23.
- Hassani, V.; Sørensen, A.; Pascoal A. (2012). Evaluation of three dynamic ship positioning controllers: from calm to extreme conditions. *IFAC Proceedings Volumes* **45**(5), 158–163.
- Hernández, L. E.; Valeriano Medina, Y.; Hernández-Julián A.; Hernández-Santana L. (2017a). Estudio sobre la estrategia de guiado l1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en uav. *RIELAC* **38**(3), 14–25.
- Hernández, L. E.; Valeriano-Medina, Y.; Hernández-Julián A.; Hernández-Santana L.; (2017b). Estudio sobre la estrategia de guiado l1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en vehículos marinos. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* **38**(3), 14–25.
- Hernández Morales, L. E. (2016). Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en vehículos autónomos. Tesis presentada en opción al grado de ingeniero en automática. Universidad Central Marta Abreus de Las Villas.
- Hernández, A. (2014). Estrategia de control para el seguimiento de camino de un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Jalving, B. (1994). The *ndre* – *auv* flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **19**(4), 497–501.
- Kelly, R.; Santibáñez, V. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson educación.

- Lekkas, A. M. (2014). Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Lemus, J. L. (2011). Software de navegación y guiado en tiempo real para Vehículo Autónomo Sumergible. Tesis presentada en opción al grado de ingeniero en automática. Universidad Central Marta Abreus de Las Villas.
- Li, R.; Li, T.; Bu R.; Zheng-Q.; Chen CL. (2013). Active disturbance rejection with sliding mode control based course and path following for underactuated ships. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Liu, Lu.; Wang, D.; Peng Z. (2017). Eso-based line-of-sight guidance law for path following of underactuated marine surface vehicles with exact sideslip compensation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **42**(2), 477–487.
- Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*. IEEE. pp. 1–4.
- Martin, A. Y. (2013). Unmanned maritime vehicles: Technology evolution and implications. *Marine Technology Society Journal* **47**(5), 72–83.
- 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.
- Moreno, D.; Chaos, D.; Aranda J.; Munoz R ; Diaz J.M.; Dormido-Canto S. (2009). Application of an aeronautic control for ship path following. *Journal of Maritime Research* **6**(2), 71–82.
- Moreno, D.; Chaos, D.; Cruz J. M.; Aranda J. (2013). Identification of a surface marine vessel using ls-svm. *Journal of Applied Mathematics* **2013**, 1–11.
- Naeem, W.; Sutton, R.; Xu T. (2012). An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft. *Ocean Engineering* **39**, 43–52.
- Navy, US. (2007). The navy unmanned surface vehicle (usv) master plan. [URL: http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf](http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf).
- Niu, H.; Lu, Y.; Savvaris A.; Tsourdos A. (2016). Efficient path following algorithm for unmanned surface vehicle. In: *OCEANS 2016-Shanghai*. IEEE. pp. 1–7.
- Ogata, K.; Yang, Y. (2002). *Modern control engineering*. Vol. 4. Prentice hall India.
- Park, S.; John D.; Jonathan P. H. (2007). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA*.
- Perez, T. (2006). *Ship motion control: course keeping and roll stabilisation using rudder and fins*. Springer Science & Business Media. New York, EE.UU.
- Pettersen, K.; Fossen, T. (1998). Underactuated ship stabilization using integral control: Experimental results with cybership i. In: *Proc. 1998 IFAC Symp. Nonlinear Control*

- Systems Design*. IFAC. Enschede, Holanda. pp. 127–132.
- Pettersen, K.; Nijmeijer, H. (2001). Underactuated ship tracking control: theory and experiments. *International Journal of Control* **74**(14), 1435–1446.
- Rodríguez, Y. (2011). Sistema remoto de supervisión y configuración de autopiloto de vehículo autónomo subacuático. Tesis de maestría. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Sehuveret Hernández, D. (2016). Estrategia de guiado para el seguimiento de caminos formados por líneas rectas y segmentos de curvas por parte de un AUV. PhD thesis. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- Shin, J.; Kwak, D. J.; Lee Y. (2017). Adaptive path-following control for an unmanned surface vessel using an identified dynamic model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **22**(3), 1143–1153.
- 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.
- Sujit, P.B.; Saripalli, S. (2014). Unmanned aerial vehicle path following. *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*.
- Sutulo, S. ; Moreira, L. ; Guedes C. (2002). Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. *Ocean Engineering* **29**(1), 1–19.
- Valeriano Medina, Y. (2013). Modelado dinámico de un vehículo autónomo subacuático.. Tesis de maestría. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Valeriano, Y. (2017). Esquema de guiado y control para el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales de un vehículo subacuático sub-actuado.. PhD thesis. PhD thesis. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- Velasco, F. J.; Revestido, E.; Lopez E.; Moyano E. (2013). Peer-reviewed technical communication. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **38**(2), 263–274.
- Wiig, M.S.; Caharija, W.; Krogstad T.R. Pettersen K.Y. (2016). Integral line-of-sight guidance of underwater vehicles without neutral buoyancy. *IFAC-PapersOnLine* **49**(23), 590–597.
- Yu, C.; Xiang, X. Dai J. (2016). 3d path following for under-actuated auv via nonlinear fuzzy controller. In: *OCEANS 2016-Shanghai*. IEEE. pp. 1–7.
- Yu, S.; Li, X.; Chen H.; Allgöwer F. (2015). Nonlinear model predictive control for path following problems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **25**(8), 1168–1182.
- Yuh, J.; West, M. (2001). Underwater robotics. *Advanced Robotics* **15**(5), 609–639.

- Zamora, HL (2011). Control de trayectoria para el hrc-auv considerando el efecto del oleaje y las corrientes marinas. *Trabajo de diploma. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. UCLV. Santa Clara, Cuba.*
- Zheng, Z.; Sun, L. (2016). Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation. *Neurocomputing* **177**, 158–167.

ANEXO A

ANÁLISIS DE RECHAZO DE PERTURBACIONES DEL ALGORITMO DE GUIADO NLGL

La siguiente Figura A-1 muestra el diagrama en bloques que se propone para hacer una análisis de rechazo de perturbaciones del esquema de guiado propuesto.

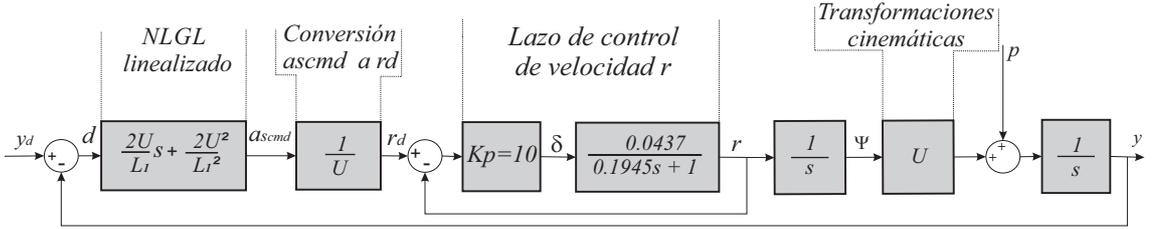


Figura A-1: Diagrama en bloques del esquema de guiado

Si se considera que no existen variaciones alrededor de la entrada referencia siendo este un sistema lineal, se puede aplicar el principio de superposición, por lo que el error ante una entrada perturbadora es prácticamente todo lo que se ve a la salida del lazo de control.

$$E_{ss} = -y_{ss} \quad (\text{A.1})$$

Para demostrar que el esquema mostrado en la Figura A-1 logra rechazar el efecto de las perturbaciones, se empleó el teorema del valor final (Ogata, 2002), que se sustenta en la ecuación A.2. Considerando que la perturbación se comporta como un paso unitario.

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) \quad (\text{A.2})$$

En este punto podemos plantear la ecuación del error para este diagrama en bloques representada de la siguiente manera:

$$y_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sy(s) \quad (\text{A.3})$$

Primeramente se cerró el lazo interno de control de r quedando como:

$$\frac{0,437}{0,1945s + 1,437}$$

Luego se procede a hallar la función de transferencia de $\frac{y(s)}{p(s)}$:

$$\frac{y(s)}{p(s)} = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}\left(\frac{2}{L_1}s + 2\frac{U}{L_1^2}\right)\left(\frac{0,437}{0,1945s+1,437}\right)\frac{U}{s}}$$

Realizando las operaciones indicadas en el denominador se obtiene:

$$\frac{y(s)}{p(s)} = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{0,874L_1s+0,874U^2}{0,1945s^3L_1^2+1,437s^2L_1^2}}$$

Agrupando los términos semejantes se llega a la expresión:

$$\frac{y(s)}{p(s)} = \frac{0,1945s^2L_1^2 + 1,437sL_1^2}{0,1945s^3L_1^2 + 1,437sL_1^2 + 0,874sUL_1 + 0,874U^2}$$

Dividiendo todo la expresión por L_1^2 :

$$\frac{y(s)}{p(s)} = \frac{0,1945s^2 + 1,437s}{0,1945s^3 + 1,437s + 0,874s\frac{U}{L_1} + 0,874\frac{U^2}{L_1^2}}$$

Aplicando el Teorema del valor final se llega al siguiente resultado:

$$y_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0,1945s^2 + 1,437s}{0,1945s^3 + 1,437s^2 + 0,874\frac{U}{L_1}s + 0,874\frac{U^2}{L_1^2}} = 0$$

Con esto se demuestra que el esquema de guiado aplicado al *Krick Felix* es capaz de rechazar las perturbaciones en este caso las corrientes marinas.