



Departamento de Control Automático

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Esquema de guiado basado en el algoritmo *NLGL* en cascada con un controlador *MPC* para un vehículo autónomo marino.

Autor: Javier Lozano Hernández.

Tutores: M. Sc. Luis Enrique Hernández Morales.

Dr. C Miguel Rodríguez Borroto.

Santa Clara, Julio 2019
Copyright©UCLV

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

“Nuestra mayor gloria no está en no caer nunca, sino en levantarnos cada vez que caemos”.

Confucio.

DEDICATORIA

A mis padres

*Por depositar su confianza en mí y esperar siempre lo mejor de mí aunque no lo hiciera
así.*

A mi hermano

Por hacer de nuestra vida una competencia sana y ser mejores cada día.

A mis abuelos

Por ayudarme en cada momento de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A mis viejos por la educación que me dieron y la paciencia que han tenido conmigo siempre.

A mi abuelo, por su preocupación y ayuda.

A mi abuelita, que aunque ya no esté siempre me quizo y me apoyó.

A mi familia en su totalidad por todo el amor.

A mis tutores, por el tiempo, dedicación y la paciencia necesaria para lograr terminar la investigación en tiempo y con calidad.

A mis compañeros de aula, sin ellos la carrera hubiera sido más difícil aún. En realidad son más que compañeros, son hermanos, en las buenas y en las malas.

A todos mis amigos por hacer de la universidad una experiencia inolvidable.

Santa Clara, Cuba, 2019

RESUMEN

El uso de los vehículos autónomos se ha convertido, en la actualidad, en una necesidad mas que en un lujo, por sus beneficios. Dentro de estos se encuentran los vehículos de superficie no tripulados. En esta investigación se propone cómo la aplicación del algoritmo de guiado basado en *NLGL* en cascada con un controlador *MPC*, es capaz de rechazar el efecto negativo de las corrientes marinas y del viento, teniendo en cuenta las restricciones físicas de los actuadores, en el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales, para el caso del vehículo de pequeño porte *Krick Felix*. Para simular los resultados se usó el modelo de 3 GDL del vehículo, siendo sometido a distintas perturbaciones medioambientales: el viento y las corrientes marinas, con las que se probó varios valores de intensidad de las mismas en el seguimiento de un camino conformado por dos puntos, arrojando cero error en el seguimiento del camino; luego se comprobó en una trayectoria compleja obteniendo el mismo resultado.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE GUIADO EN VEHÍCULOS AUTÓNOMOS MARINOS	6
1.1. Introducción	6
1.2. Evolución y desarrollo de los vehículos autónomos marinos	6
1.3. Descripción general del <i>Krick Felix</i>	8
1.4. Sistema de control de movimiento	12
1.5. Algoritmos de guiado	13
1.6. Algoritmo MPC	15
1.7. Consideraciones finales.	16
2. Esquema de guiado basado en <i>MPC</i> y <i>NLGL</i>	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	22
2.3. Modelo dinámico no lineal de 3 GDL para el <i>Krick Felix</i>	22
2.4. Modelos linealizados	24
2.4.1. Subsistema lateral	24

2.5.	Modelado de las corrientes marinas	26
2.6.	Modelado del viento	27
2.7.	Control Predictivo basado en un Modelo	28
2.7.1.	Selección del modelo de predicción	30
2.7.2.	Función de costo	31
2.7.3.	Restricciones	32
2.7.4.	Herramienta <i>mpcDesigner</i> de <i>MatLab</i>	32
2.8.	Algoritmo de guiado NLGL	32
2.8.1.	Linealización del algoritmo	35
2.9.	Consideraciones finales del capítulo	36
3.	Ajuste y evaluación del esquema de guiado basado en <i>MPC</i> y <i>NLGL</i>	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Esquema del sistema controlado	37
3.3.	Sintonización del controlador MPC	37
3.4.	Resultados de las simulaciones	39
3.4.1.	Evaluación de seguimiento para un camino simple	40
3.4.2.	Evaluación de seguimiento para un camino formado por varios tramos rectos	40
3.5.	Análisis económico y medioambiental	43
3.6.	Consideraciones finales del capítulo	44
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de los vehículos no tripulados brinda opciones que antes no podían ser logradas en esferas tales como la exploración, el transporte y diferentes investigaciones. Son utilizados tanto en la tierra, en el aire como en el mar. Su estudio y desarrollo está impulsado por los beneficios económicos que aportan. Gracias a que se dotan de sensores de alta precisión y complejas, compactas y económicas unidades de cómputo, de bajo consumo energético y adecuado procesamiento de datos ([Valeriano, 2017](#)), se han podido delegar en ellos tareas sin la supervisión humana directa, se han logrado importantes ahorros económicos y desarrollo de tareas con menor cantidad de accidentes. Las razones mencionadas, entre muchas otras, han impulsado su estudio y desarrollo.

Los vehículos marinos no tripulados (UMV), son pequeñas embarcaciones que por su alto grado de autonomía no requieren de la acción directa de un operador para realizar las muy diversas misiones que les son asignadas: en la exploración del ambiente marino, en la pesca, el estudio de la flora y la fauna, la protección de las costas, entre otras, incluso en ambientes hostiles ([Manley, 2008](#)).

El correcto funcionamiento de estos equipos se logra mediante un algoritmo de guiado, capaz de rechazar las múltiples perturbaciones medioambientales; como pueden ser, las fuertes corrientes marinas, las olas y el viento y con ello lograr mantener la ruta asignada con mínimas desviaciones.

El desarrollo de los USV, por sus siglas en inglés, vehículos de superficie no tripulados, comenzó a finales del siglo pasado en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) con un proyecto para desarrollar vehículos autónomos y estudiar su comunicación, navegación y control ([Caccia, 2005](#)). Gracias a esto surgieron el ARTEMIS, el ACES y el AutoCat. Importante destacar que estos equipos son también muy usados con fines militares, en la detección de minas y el patrullaje de puertos y costas.

En nuestro país también se ha trabajado en estos temas, por ejemplo, en el Grupo de Automática, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV). Entre sus trabajos destacan las investigaciones relacionadas con el seguimiento de la trayectoria de vehículos autónomos, probados con un bote robótico adquirido recientemente, llamado *Krick Felix*, y también con un submarino, denominado *HRC – AUV*. Estos trabajos han arrojado buenos resultados por lo que se continúa el desarrollo de los mismos.

El sistema de guiado se encarga de mantener el movimiento transitorio de los vehículos, con el objetivo de lograr el seguimiento de sus rutas (Breivik, 2009), para ello calcula continuamente su posición, velocidad y aceleración. Sus componentes básicos son sensores de movimiento y de captura de datos meteorológicos: velocidad y dirección del viento, altura y pendiente de las olas, los que una vez recopilados pasan a la unidad de procesamiento y finalmente son utilizados por el sistema de control de movimiento (Lekkas, 2014).

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

El sistema de guiado está constituido por dos subsistemas, uno se encarga de establecer el camino, mientras que el otro se encarga de seguirlo. Es su tarea también, mantener el flujo de datos al controlador para que este sea capaz de lograr que el vehículo siga la ruta de la forma más precisa posible (Fossen, 2011; Cruz, 2012). En esta investigación se trabaja el escenario de path following (PF), en la cual se abordan varias soluciones de guiado, separadas en dos grupos: geométricas y de control.

Las soluciones de geométricas, fueron primeramente usadas en investigaciones relacionadas con el movimiento de los misiles (Breivik, 2009). Entre las más usadas se encuentra *LOS* (Line of Sight), ella se basa en el seguimiento de un camino previamente definido, ya sea recto o curvo (Lekkas, 2014). Fue usada por el GARP en una primera investigación con el *HRC – AUV*, sin embargo esta estrategia no garantiza cero error durante el seguimiento de camino en presencia de perturbaciones medioambientales (Valeriano-Medina, 2013b). A esta estrategia se le han realizado modificaciones para eliminar el efecto de las perturbaciones, y para ello se le agrega una acción integral (Lekkas, 2014), convirtiéndola en *I – LOS*, lo cual ha dado buenos resultados en el GARP. Ha sido probada en simulaciones y en experimentos reales (Hernández, 2014), y luego utilizada en una tesis doctoral (Valeriano, 2017), en la cual se propone 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. Otra estrategia alternativa usada recientemente en el departamento, fue el algoritmo *NLGL* (Mesa, 2018), la cual demostró que es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de caminos rectos por un vehículo marino, en presencia de corrientes marinas.

Las soluciones de control son muy utilizadas en el escenario PF, principalmente las no lineales (Caharija, 2015; Zheng, 2016). El control *PID* constituye una de ellas (Arshad, 2004; Abreu, 2016; Rout, 2017b). Un caso donde se diseña un controlador de dirección *PID* junto a un controlador anticipatorio, para lograr maniobras precisas de cambio de rumbo, se puede encontrar en la investigación realizada por (Banazadeh, 2013). Podemos mencionar otros tipos de estrategias usadas para control de dirección, como el control adaptativo, de manera independiente (Borhaug, 2008; Rout, 2017a) o combinado con otra

estrategia (Chen, 2016), y el control en modo deslizante (Zhang, 2013; Song and Arshad, 2015; Lakhekar, 2015).

Un ejemplo de las estrategias mencionadas con anterioridad es el diseño del controlador de rumbo en modo deslizante para el *HRC – AUV* (Medina *et al.*, 2016), el cual es evaluado mediante simulación, mostrando que la ley de control implementada asegura la estabilidad y robustez del sistema.

El Control Predictivo por Modelo (MPC), es una técnica de control, que une la optimización del proceso con la retroalimentación para tratar con sistemas sujetos a restricciones en entradas y estados (Li, 2012; Steenson, 2014). Usando un modelo explícito, y el estado actual medido o estimado como el estado inicial para predecir la respuesta futura de una planta, MPC determina la acción de control resolviendo el problema en línea en cada intervalo de muestreo, con el uso de un horizonte finito de predicción de lazo abierto. Debido a su atractivo natural para los sistemas multivariables, MPC puede manejar el problema bajo-accionado o sobre-accionado de manera efectiva mediante la combinación de todos los objetivos en una sola función objetivo.

Este algoritmo se conoce por su robustez, también porque es computacionalmente intensivo. En la actualidad hay mejoras de rendimiento que lo hacen más eficientes (Li, 2012). En este estudio, se terminó satisfaciendo las restricciones de estado, eliminando el error de estado estable y reduciendo las oscilaciones de estado y control.

El MPC ha sido probado también en UMV (Steenson, 2014), demostrando su viabilidad, ya que maneja varios grados de libertad usando un modelo del sistema con restricciones, donde el algoritmo de control calcula las entradas de control óptimas sobre un número finito de intervalos de tiempo con el objetivo de reducir el error. Las restricciones son especificadas dentro del controlador, habilitando así el control óptimo a ser calculado dentro de sus restricciones indicadas. En este artículo, demuestran que el MPC da resultados con alta calidad en la ejecución, donde se ve que mantiene un control estable tanto de la profundidad como del ángulo de inclinación. La robustez y fiabilidad de este algoritmo es también demostrada en (Shen, 2018) pues se garantiza estabilidad en el control de movimiento, e implementan un algoritmo para romper las barreras computacionales, lo que hace incrementar sus posibilidades. En (Sotnikova, 2012) se demuestra que los algoritmos MPC se pueden utilizar para proporcionar procesos de control de alta calidad, se consideraron dos situaciones diferentes: maniobra de círculo de giro y proceso de aceleración para embarcaciones de alta velocidad. En ambas situaciones, el esquema MPC tiene superioridad con respecto a otros enfoques de control. En (Zheng *et al.*, 2014), se proponen dos enfoques de MPC para abordar el problema del seguimiento de la trayectoria horizontal no lineal de los vehículos autónomos de superficie marina. El primer enfoque diseña un controlador MPC no lineal (NMPC); el segundo enfoque utiliza un modelo linealizado (LMPC). El NMPC tiene la ventaja de un mejor rendimiento en el seguimiento, pero es

más complejo computacionalmente, especialmente en horizontes de predicción más grandes; sin embargo, el LMPC, aunque muestra un rendimiento de seguimiento relativamente pobre, parece ser factible de implementar en tiempo real si la precisión de seguimiento no es muy estricta y la posición inicial no se desvía demasiado del punto de seguimiento.

El GARP, como se expone anteriormente, ha trabajado principalmente con soluciones de guiado geométricas, estas aunque son más sencillas de implementar, representan un mayor esfuerzo de control que las soluciones basadas en teoría de control. Se conoce también que la dinámica de la pequeña embarcación, *Krick Felix*, es no lineal, lo que conlleva a una mayor dificultad a la hora de diseñar un control interno para el guiado de la misma. Además, se suma a esto las limitaciones físicas que traen consigo los actuadores, ya que son débiles ante los cambios bruscos o incluso a los muy pequeños. Además de que es un vehículo subactuado, lo que incrementa todas esas dificultades.

Por lo que se propone el siguiente **problema científico**: No se dispone de un esquema de guiado y control para vehículo marino subactuado *Krick Felix* que sea capaz de tener en cuenta las restricciones asociadas a los actuadores y las salidas durante el proceso de diseño y a su vez garantice precisión y cero error en el seguimiento de caminos rectos en presencia de las perturbaciones medioambientales.

Con esta investigación se pretende cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Proponer un esquema de guiado basado en el algoritmo *NLGL* en cascada con un controlador *MPC* que garantice precisión durante el seguimiento de caminos rectos para el *Krick Felix* en presencia de perturbaciones medioambientales teniendo en cuenta las restricciones asociadas a los actuadores del vehículo.

Objetivos específicos:

1. Establecer el marco teórico relacionado con el seguimiento de caminos en vehículos marinos.
2. Definir los parámetros del modelo matemático del bote *Krick Felix*.
3. Establecer un esquema de guiado basado en el algoritmo *NLGL* en cascada con un controlador *MPC* para el bote robótico *KrickFelix*.
4. Evaluar mediante simulación el esquema de guiado propuesto para el *Krick Felix*.

Hipótesis:

Un esquema de guiado basado en el algoritmo *NLGL* en cascada con el controlador *MPC* garantiza precisión durante el seguimiento de caminos rectos teniendo en cuenta las restricciones físicas de los actuadores, a pesar de la presencia de perturbaciones medioambientales.

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

- Revisión bibliográfica sobre la temática de seguimiento de caminos en vehículos marinos.
- Estudio de la dinámica del vehículo *Krick Felix*.
- Estudio sobre estrategias de guiado utilizadas en vehículos marinos sub-actuados.
- Estudio sobre los algoritmos de guiado utilizados en vehículos marinos sub-actuados.
- Implementación del esquema de guiado propuesto en la herramienta Simulink.
- Evaluación mediante simulación del esquema de guiado propuesto en el seguimiento de trayectorias rectas.
- 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 general del vehículo autónomo marino de superficie *Krick Felix*. Se efectúa un análisis de los principales aspectos relacionados con la selección de un esquema de guiado. Se realiza una valoración crítica sobre los mismos.

Capítulo II: Se hace una descripción del modelo matemático del vehículo marino y de las perturbaciones medioambientales. Se explica la estructura del controlador MPC, en cascada con el algoritmo de guiado NLGL .

Capítulo III: Se realiza el ajuste del controlador MPC y del sistema de control de dirección y se presentan simulaciones para el seguimiento de trayectorias rectas en presencia de perturbaciones marinas. Se analiza el cumplimiento de los objetivos. Además se realiza un análisis económico y medioambiental 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* y sus principales características constructivas. Se describen los diferentes escenarios de control para el guiado, con énfasis en el seguimiento de caminos sin restricciones temporales (*Path Following*). Por último, se realiza un análisis de las principales estrategias utilizadas para el guiado de vehículos en este escenario.

1.2. Evolución y desarrollo de los vehículos autónomos marinos

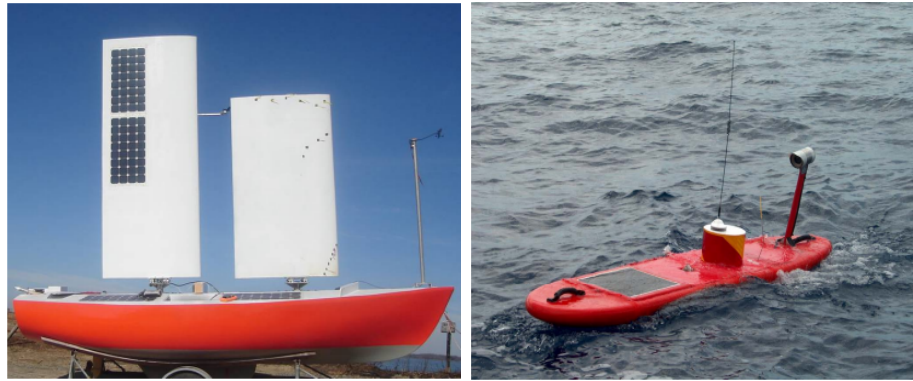
El término embarcaciones marinas utilizado incluye todo tipo de estructuras que operan en el mar. Entre ellas se pueden encontrar: barcos, plataformas flotantes y submarinos ([Fossen, 2011](#)). Aquí también se encuentran los vehículos de superficie no tripulados (*USV*).

El surgimiento de los vehículos autónomos de superficie se remonta al siglo pasado. Durante la Segunda Guerra Mundial fueron utilizados para la detección de minas y el análisis de los resultados de las batallas marinas. Con posterioridad al lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki por EEUU, se usaron para la recolección de datos acerca de los daños producidos. Como ocurre por lo general con las novedades de la ciencia y la técnica, también en este caso, la esfera militar acumula el mayor desarrollo de los USV ([Manley, 2008](#)), y son utilizados principalmente en la vigilancia y reconocimiento de las costas, en la guerra anti-submarina, y más recientemente en las simulaciones de ataque costero para combates de entrenamiento ([Shin, 2017](#)).

El auge alcanzado en la actualidad por los USV, ha permitido su utilización con fines o usos civiles ([Manley, 2008](#)), lográndose un mayor avance en el estudio del ambiente marino. Gracias a ello, las exploraciones y construcción de infraestructuras para el gas y el petróleo en el mar han recibido un impulso significativo. Se dice que la humanidad conoce más del espacio exterior que del propio fondo oceánico, pero con el desarrollo de los vehículos autónomos marinos ha aumentado el conocimiento del mismo, y con ello un

mayor conocimiento medioambiental de las mareas, las corrientes marinas y los distintos eventos meteorológicos relacionados (Shin, 2017).

El creciente interés despertado en estas tecnologías ha hecho posible el uso de recursos renovables de energía para impulsar estos vehículos: el sol, el viento e incluso las olas. Actualmente una compañía denominada Unmanned Ocean Vehicles Inc. ha desarrollado un prototipo Figura 1-1(a), equipado con velas rígidas y celdas solares para alimentar una embarcación con operación autónoma, capacidad de comunicación inalámbrica, generación de energía eléctrica y recolección de datos sensoriales (Manley, 2008).

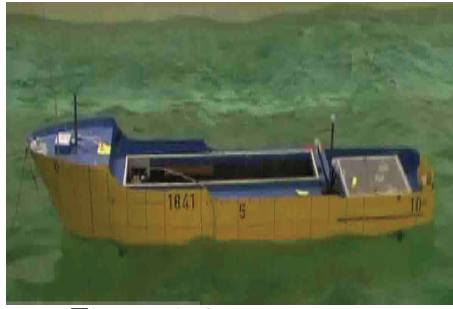


(a) Prototipo de USV tipo velero (b) Wave Glider
Figura 1-1: Ejemplos de USV actuales

Estos vehículos pueden aprovechar la energía de la acción de las olas para sus necesidades de propulsión y los paneles solares que alimentan la electrónica a bordo, garantizan su funcionamiento por periodos muy prolongados. Como ejemplo de esto tenemos a los prototipos Wave Glider Figura 1-1(b) que han demostrado despliegues de hasta 142 días, durante los cuales recorrieron más de 2500 millas náuticas. Los vehículos mostraron un excelente rendimiento a lo largo de esta demostración de presencia casi persistente. Este nuevo enfoque de los USV con una envergadura minimizada, hace que sean de gran interés para las actividades de vigilancia. Su larga resistencia y capacidad de carga útil escalable lo convierten también en un candidato probable para muchas aplicaciones científicas (Manley, 2008).

El Departamento de Ingeniería Cibernética de la Universidad de Noruega de Ciencia y Tecnología ha desarrollado embarcaciones a escala como son los casos del *Cybership I, II, III* (CS1, CS2 y CS3). Estas fueron desarrolladas con el objetivo de realizar investigaciones para mejorar los conocimientos en las ramas del control y del modelado.

Los distintos modelos del Cybership han estado muy bien equipados con actuadores y controladores especializados. Fueron usados en muchas investigaciones como por ejemplo el *CSI* para desarrollar estrategias de control de seguimiento para un vehículo marino autónomo (Pettersen, 2001). Un control de trayectoria robusto y adaptativo, que puede

Figura 1-2: *Cybership III*

ser empleado en vehículos de superficies que navegan de conjunto con un ROV, fue diseñado para ser utilizado en el *CS2* (Sveen, 2003).

El *CS3*, Figura 1-2 es el más actual de los 3, tiene dos propelas ubicadas en la popa y dos propulsores en la proa. A bordo contiene una computadora que usa el Sistema Operativo de Tiempo Real QNX, que se comunica inalámbricamente con una computadora en tierra, donde está el sistema de control implementado. En esta embarcación se ha evaluado el desempeño de tres controladores de posición diferentes: controlador no lineal multivariable PID, controlador difuso lineal cuadrático gaussiano 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 una embarcación utilizada en el puerto de Hamburgo, construida en 1960 y utilizada para operaciones portuarias y de transportación.

El modelo ha sido adquirido recientemente por el GARP para continuar abordando la temática del guiado de vehículos autónomos. Su casco está fabricado con un material conocido como *Acrilonitrilo Butadieno Estireno* de alta calidad, dispone de una quilla moldeada para facilitar la instalación del timón. A su vez la línea de flotación marcada en el casco facilita la instalación del timón. Para su movimiento la embarcación cuenta con un motor eléctrico y una propela acoplada. Algunas de las principales especificaciones geométricas de la embarcación se muestran en la Tabla 1-1 (Balanza Llama, 2017).

Figura 1-3: *Krick Felix*.

El *Krick Felix* originalmente brinda la posibilidad de pilotar la embarcación de forma remota manual. Para ello cuenta con una estación de radio-control DEVO RX701 a bordo. Este módulo de radio posee un espectro de expansión de frecuencia directa de 2.4 GHz que facilita reacción rápida y protección anti-atascamiento. Para la comunicación se utiliza un codificador *PPM* (*Pulse Position Modulation*) *V2 - Fishbonne* (Balanza Llama, 2017), cuya función consiste en agrupar diferentes señales *PWM* (*Pulse Widht Modulation*) en una.

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

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.

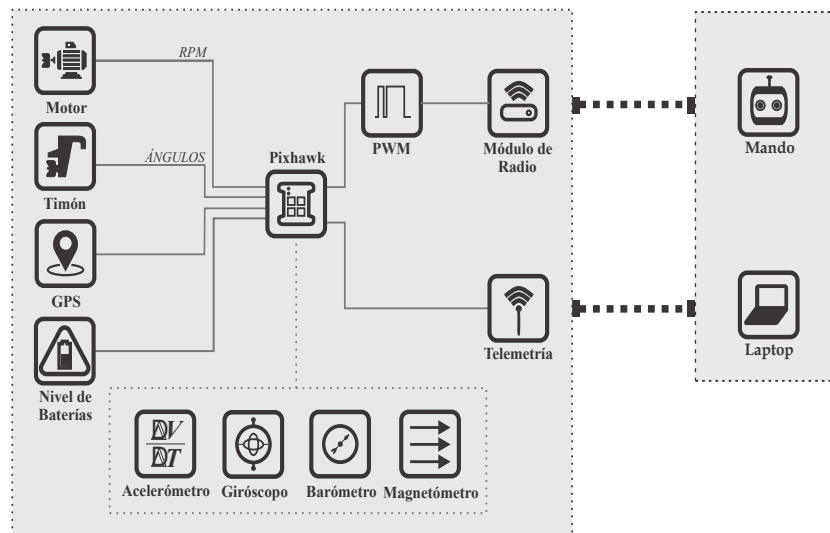


Figura 1–4: Arquitectura de hardware para el *Krick Felix*

El hardware de control para el vehículo es el autopiloto *Pixhawk Px4* Figura: 1–5, que consiste en una placa, con la electrónica diseñada para el control remoto de vehículos

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)

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) y tiene acoplado un servo motor digital *Robbe* FS61bb de 4.8 - 6 V.

Figura 1–5: Hardware de control *Pixhawk Px4*

El software que se ejecuta en la computadora se utiliza como herramienta de supervisión y configuración a distancia del vehículo. Este programa es conocido como *Mission Planner* Figura 1–6. Se trata de un software de configuración, supervisión, simulación y control

de las plataformas *ArduPilot*. Es compatible con *Windows* y puede ser utilizado para la configuración o como suplemento para el control dinámico de un vehículo autónomo.

Entre las principales funcionalidades que brinda este *software* se encuentran ([ArduPilot, 2019](#)):

- Cargar *firmwares* de los proyectos soportados por *ArduPilot*.
- Ajustar y auto-ajustar los controladores internos encargados del comportamiento del vehículo.
- Planificar, cargar y guardar misiones autónomas.
- Monitorear el estado del vehículo durante la ejecución de la misión y cambiar parámetros de la misma.
- 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 como quedan instalados los elementos de hardware en la embarcación.



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

1.4. Sistema de control de movimiento

Para lograr la autonomía en los vehículos marinos es necesario contar con un sistema de control de movimiento, en el cual se distinguen tres partes principales (Fossen, 2011): el sistema de guiado, sistema de navegación y sistema de control, como se refleja en la Figura 1-8

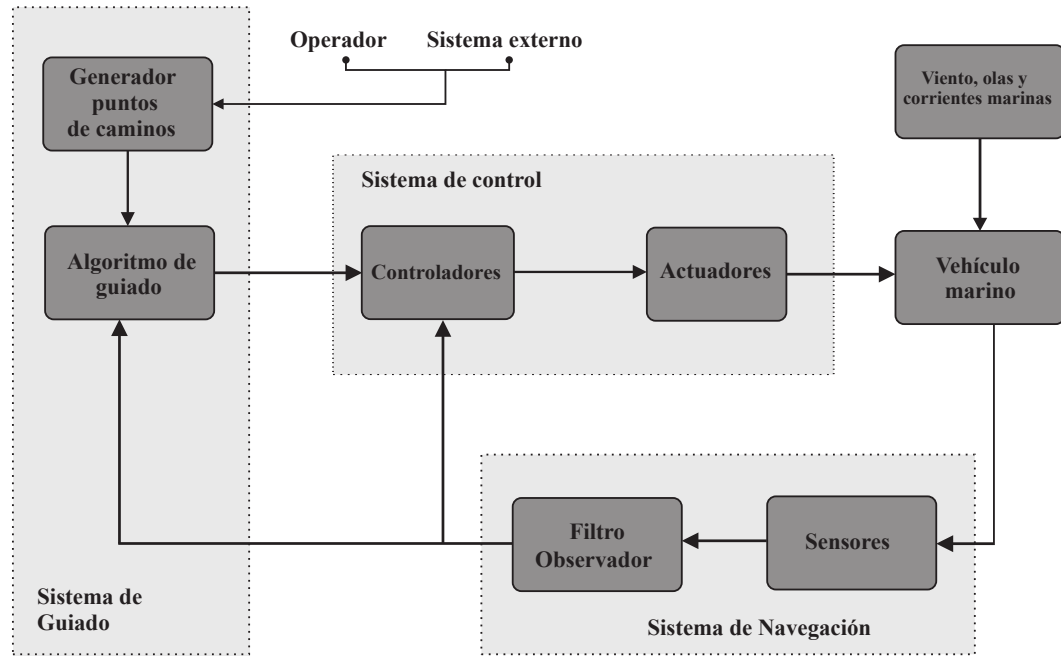


Figura 1-8: Sistema de Control de Movimiento para un vehículo.

La función del **sistema de navegación** se centra en la determinación de la posición y la distancia recorrida por el vehículo, lo que puede ser logrado por la vía del Sistema de Posicionamiento Global (GPS); mediante sensores: acelerómetros y giroscopios, o la combinación adecuada de ambos (Perez, 2006). A partir del conocimiento del camino recorrido y los datos obtenidos por el sistema de navegación, se determina la referencia a utilizar por el sistema de control, y con ello los comandos necesarios para que los actuadores posicionen la embarcación en las coordenadas deseadas (Sehuveret Hernández, 2016).

El **sistema de control** determina las fuerzas y momentos que necesitan ser aplicadas al vehículo para satisfacer un determinado objetivo de control (Fossen, 2011). El algoritmo de control correspondiente debe basarse en el diseño de controles realimentados y leyes de control anticipatorio. El sistema de control tiene como función calcular y aplicar las fuerzas necesarias a las que deben ser sometidos cada uno de los actuadores con el fin de seguir la trayectoria descrita por el sistema de guiado (Lekkas, 2014).

El **sistema de guiado** constituye el algoritmo básico para determinar el comportamiento del movimiento del vehículo, con la intención de lograr el seguimiento de la trayectoria prevista (Breivik, 2009). Se encarga de calcular continuamente la posición de referencia, la velocidad y la aceleración del vehículo para ser después utilizada por el sistema de control de movimiento. Sus componentes físicos básicos son sensores de movimiento y

un ordenador encargado de recopilar y procesar la información de datos externos, en primer lugar meteorológicos, para luego enviar los resultados del procesamiento al sistema de control del movimiento (Lekkas, 2014). Estos dos últimos cuentan con dos elementos fundamentales: el controlador de rumbo y un algoritmo o ley de dirección para el guiado. Estos elementos pueden ser desarrollados por separados a partir de un esquema de guiado (Valeriano, 2017; Hernández Morales, 2019) o pueden estar integrado en un solo algoritmo o estrategia de control (Caldwell, 2006).

1.5. Algoritmos de guiado

La palabra guiado, cuando es utilizada para referirse al guiado de un cuerpo u objeto, se refiere al método, procedimiento o algoritmo empleado para dirigir su movimiento a lo largo de una trayectoria. El guiado constituye la acción de conducir la trayectoria de un objeto hacia un punto que puede estar en movimiento (Breivik, 2010).

El sistema que se encarga del guiado se compone de dos partes imprescindibles, la primera tiene como función la generación del camino y la segunda maneja los algoritmos que permiten el seguimiento. Este sistema también tiene como una de sus funciones fundamentales la de suministrar al controlador variables importantes: velocidad, posición y aceleración, de forma continua, la finalidad de todo esto es de que el vehículo recorra la ruta señalada de la manera más precisa posible (Fossen, 2011; Cruz, 2012).

En dependencia del tipo de maniobra, es necesario seleccionar el escenario de control a desarrollar en el sistema de guiado (Breivik, 2009). Los escenarios de control en ocasiones tienen que ser capaces de utilizar la información de los futuros movimientos del 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*): Es definida por el seguimiento de un objetivo, este puede ser un objetivo en estado estacionario o en movimiento, de este solo se conoce su velocidad instantánea, o sea la que tiene en el instante de tiempo actual y no se conoce 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*): En este caso se conoce completamente el camino ya definido que hará el objetivo. Las restricciones temporales y espaciales son importantes en este caso.

Maniobras a lo largo de un camino (*Path Maneuvering, PM*): El objetivo de este escenario es lograr seguir un camino predefinido con la mayor eficiencia posible, donde se priorizan las restricciones espaciales por encima de las temporales. Estos casos se ven en los vehículos con limitaciones de maniobrabilidad.

Seguimiento de camino (*Path Following, PF*): Su objetivo es seguir un camino previamente definido y solo tiene en cuenta 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 soluciones geométricas fueron utilizadas inicialmente en investigaciones relacionadas con el movimiento de los misiles (Breivik, 2009). Una de las más utilizadas es la estrategia conocida como Línea de Visión (*Line of Sight, LOS*), debido a que funcionan siguiendo un punto u objetivo definido, con algunas variantes para el seguimiento de caminos rectos y curvos (Lekkas, 2014). Otro ejemplo significativo de las geométricas es el algoritmo NLGL (Moreno, 2009; Curry, 2013; Sujit, 2014). Estas estrategias por lo general dan señales de mando muy fuertes que afectan los actuadores, los cuales tienen limitaciones ante cambios bruscos o cambios muy pequeños, por lo que se busca desarrollar estrategias de control que no afecten los actuadores a largo plazo y sean capaces de dar señales más factibles a los vehículos.

Existen muchas estrategias de control cuyos diseños se basan tanto en modelos lineales como no lineales. Entre los que utilizan los modelos lineales están las que usan los controladores convencionales tipo *PID* (Arshad, 2004; Rout, 2017b), y el caso de la investigación realizada por (Banazadeh, 2013) donde a partir de una función de transferencia que describe la dinámica de balanceo y guiñada de un vehículo acuático en concordancia a lo que expresa el modelo de *Nomoto*, diseña un controlador *PID*, en adición a un control anticipatorio, para lograr maniobras precisas de cambio de rumbo. A la hora de usar los modelos lineales se hacen más fáciles los cálculos y las implementaciones de los algoritmos, pero en la práctica se ha demostrado que son más usadas las que se basan en modelos no lineales.

Un caso no lineal lo encontramos en (Caharija, 2015), en el cual se realiza una comparación entre *I-LOS*, que añade una acción integral a la estrategia *LOS*, y el campo vectorial *VF*. Se demuestra que *VF* tiene resultados ligeramente mejores, aunque la estrategia *I-LOS* da comandos de servo más suaves, con lo que garantiza una menor sobrecarga sobre los actuadores. Otras técnicas muy conocidas son el control en modo deslizante (Li, 2013), los basados en control inteligente (Yu, 2015) y los de lógica difusa (Qi, 2016).

En el GARP, se han desarrollado varias estrategias de guiado, tanto geométricas como de control, se usó *LOS* en (Valeriano-Medina, 2013a), luego fue demostrado que *I-LOS* mejora la respuesta ante las perturbaciones marinas (Hernández, 2014), y posteriormente en una tesis doctoral (Valeriano, 2017), se utiliza 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. Recientemente fue usada la estrategia *NLGL* por el GARP, demostrando que es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de

caminos rectos, en presencia de corrientes marinas, para el caso de un vehículo marino (Mesa, 2018; Hernández Morales, 2019).

1.6. Algoritmo MPC

Otra estrategia, que ha sido probada en vehículos autónomos para realizar el seguimiento de caminos es el Control Predictivo basado en el Modelo. En distintas investigaciones ha demostrado un buen rendimiento para cumplir el objetivo (Pavlov, 2009; Shen, 2018). Esta estrategia ha sido probada en conjunto con otras estrategias, como *LOS* (Naeem, 2002; Oh, 2010), y también ha demostrado su rendimiento sola (Li, 2012; Steenson, 2014).

El MPC, control predictivo por modelo, tiene sus raíces en el control óptimo. Se basa en principio, en usar el modelo dinámico de un sistema o planta para pronosticar el comportamiento futuro del mismo y optimizar al mismo tiempo dicho pronóstico y con ello predecir la mejor decisión a tomar en función de lo que se desea controlar. Es capaz de aceptar cualquier tipo de modelo (Rawlings and Mayne, 2015).

La primera vez que fue utilizada la estrategia fue a finales de la década de 1960, pero fue prácticamente ignorada y considerada como un controlador convencional (Maciejowski, 2002). Sus primeras aplicaciones aparecieron en las industria petroquímicas y de defensa. A partir de entonces las investigaciones cobraron mayor auge.

El MPC en su forma más general acepta cualquier tipo de modelo, funciones objetivo o restricciones y también puede ser usado para tratar con modelos lineales o no lineales, en estos casos recibe la denominación NMPC, por sus siglas en inglés. Este requiere de la solución iterativa de problemas de control para la optimización usando un horizonte de predicción finito (Bock, 2000; Findeisen, 2007).

El control predictivo por modelo, posee variantes muy robustas en la teoría del control, ya que es capaz de considerar perturbaciones acotadas y fijadas, mientras se asegura que todavía se cumplan las restricciones de estado. Algunas de las variantes son:

- MPC con *min-max*, realiza la optimización con respecto a todas las posibles evoluciones de la perturbación (Scokaert and Mayne, 1998). Es muy buena para solucionar problemas de control robusto lineal, pero a costa de un alto uso computacional.
- MPC con *ajuste de limitación de restricciones*, en este caso, las restricciones de estado se magnifican hasta un margen dado con el fin de garantizar una trayectoria de estado bajo cualquier evolución de la perturbación (Mayne, 2000).
- MPC de *tubo*, usa un modelo de sistema nominal e independiente, y un controlador realimentado para asegurar que el estado real converja al nominal (Findeisen, 2007).

En el estudio realizado por (Naeem, 2002) se investiga la aplicación del MPC en el control del ángulo de guiñada de un AUV. Utiliza el esquema *LOS* para calcular la referencia que debe seguir el vehículo, la cual fue validada mediante simulación. Obteniéndose resultados

muy satisfactorios, al demostrar que el vehículo es capaz de seguir correctamente el camino, cumpliendo con las restricciones a las que fueron sujetos los actuadores. Esto también fue probado por la investigación de (Oh, 2010).

El MPC, une la optimización del proceso con la retroalimentación para tratar con sistemas sujetos a restricciones en entradas y estados (Li, 2012; Steenson, 2014). Utiliza un modelo explícito, y el estado actual medido o estimado, como estado inicial para predecir la respuesta futura de una planta. El controlador MPC determina la acción de control resolviendo el problema en línea en cada intervalo de muestreo, con el uso de un horizonte finito de predicción de lazo abierto. Debido a su atractivo natural para los sistemas multi-variables, MPC puede manejar el problema subactuado o sobreactuado de manera efectiva mediante la combinación de todos los objetivos en una sola función objetivo.

En (Steenson, 2014) se demuestra que el algoritmo MPC es capaz de controlar un AUV sobreactuado. Fue probado en simulaciones y también en la práctica. Con él se obtienen resultados con alta calidad en la ejecución, manteniendo un control estable, tanto de la profundidad como del ángulo de inclinación. En una tesis de doctorado, (Shen, 2018), se demuestra nuevamente que el MPC en un AUV garantiza estabilidad en el control de movimiento, con la implementación de un algoritmo que rompe las barreras computacionales incrementando las posibilidades del algoritmo.

En (Sotnikova, 2012) se demuestra que los algoritmos MPC se pueden utilizar para obtener procesos de control de alta calidad. Allí se consideraron dos situaciones diferentes: maniobra de círculo de giro y el proceso de aceleración de alta velocidad para embarcaciones. En ambas situaciones, el esquema MPC tiene superioridad con respecto a otros enfoques de control.

En (Zheng *et al.*, 2014), se proponen dos enfoques de MPC para abordar el problema del seguimiento de la trayectoria horizontal no lineal de los vehículos autónomos de superficie marina. El primer enfoque diseña un controlador MPC no lineal (NMPC) y el segundo utiliza un modelo linealizado (LMPC). El NMPC tiene la ventaja de un mejor rendimiento en el seguimiento, pero es más complejo computacionalmente, especialmente en horizontes de predicción más grandes; sin embargo, el LMPC, aunque muestra un rendimiento de seguimiento relativamente pobre, es adecuado para su utilización en tiempo real, si la precisión de seguimiento no es muy estricta y la posición inicial no se desvía demasiado del punto de seguimiento.

1.7. Consideraciones finales.

Como resultado del análisis de la literatura especializada relacionada con el objetivo de este trabajo, se pueden enunciar las siguientes consideraciones.

- Desde que surgieron los *USV* se ha demostrado la importancia de su uso tanto en lo militar como en lo civil, y su desarrollo crece exponencialmente.

- Se hace necesaria la implementación de mejores algoritmos de guiado para cada uno de los *USV*, para que logren con la mejor eficiencia todas las posibles tareas a las que puedan ser sometidos.
- Se considera que un esquema de guiado basado en el algoritmo **NLGL** en cascada con un controlador **MPC** para el vehículo *Krick Felix*, asegura precisión durante el seguimiento de caminos rectos en presencia de las corrientes marinas.

En el siguiente capítulo se describirá el modelo de 3 GDL para el *Krick Felix* así como la representación matemática de las principales perturbaciones medioambientales que afectan al vehículo, se presentarán además los fundamentos teóricos que sustentan la estrategia de control **MPC** y el algoritmo de guiado **NLGL**.

Capítulo 2

ESQUEMA DE GUIADO BASADO EN *MPC* Y *NLGL*

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático no lineal de 3GDL del *Krick Felix*, que será utilizado para las simulaciones que serán presentadas en esta investigación, así como un modelo linealizado del mismo para ser utilizado en la sintonía del MPC. Además, se muestra la representación matemática de las principales perturbaciones medioambientales que afectan al vehículo: el viento y las corrientes marinas. Por último, se presentan los postulados matemáticos de la estrategia MPC.

2.2. Ecuaciones de movimiento para vehículos marinos

Cuando un cuerpo u objeto se desplaza es capaz de experimentar movimientos en los 6 grados de libertad (GDL), en especial un vehículo marino cuando navega. Los grados de libertad son determinados según como se desplace o rote el cuerpo, cada uno independiente del otro, logrando así especificar su posición y orientación. 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

Los estudios realizados sobre embarcaciones marinas en los 6 GDL (Fossen, 2011), muestran que es conveniente definir dos sistemas de coordenadas como se indica en la Figura 2–1 (Balanza Llama, 2017). El sistema de referencia móvil es en este caso el vehículo y es llamado Sistema del Barco. Su origen es situado 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)

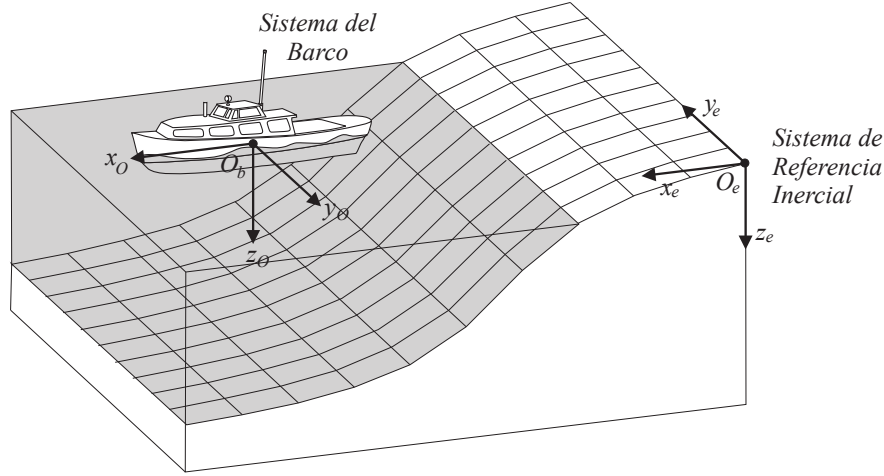


Figura 2-1: Sistemas de coordenadas

Se puede asumir que los barcos son longitudinal y lateralmente metacéntricos con pequeñas amplitudes de los ángulos $\phi = \theta = \dot{\phi} = \dot{\theta} \approx 0$, por lo que es posible descartar la dinámica de balanceo y cabeceo. Por otro lado, debido a la flotabilidad del barco $z \approx 0$, la dinámica relativa al movimiento de arfada también se desprecia. Luego, 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 expresan de la 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:

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

Se puede describir el comportamiento dinámico de la embarcación aplicando la segunda Ley de *Newton* (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 las 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).

Agrupando términos semejantes la ecuación queda 2.4:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau \quad (2.4)$$

2.2.1. Dinámica del cuerpo rígido

Las matrices, que denotan las características del cuerpo rígido, 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 (Balanza Llama, 2017):

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mX_g \\ 0 & mX_g & I_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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.

La matriz de *Coriolis* del cuerpo rígido, queda de la siguiente forma (Balanza Llama, 2017):

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mX_g r \\ mr & 0 & 0 \\ mX_g r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.2. Términos de masas añadidas

La embarcación al moverse lo hace de forma armónica, lo que causa que existan masas añadidas definidas como las fuerzas y momentos inducidos debido a ese movimiento. Estas masas son proporcionales a la aceleración del vehículo, como consecuencia de ello es que las masas añadidas y la aceleración estén desfasadas 180 grados con respecto al movimiento armónico del vehículo (Fossen, 2002).

A continuación, se representan 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:

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{C}_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}\nu - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ Y_{\dot{v}}\nu + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r & -X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Se conoce que los elementos que no forman parte de la diagonal principal de las matrices $\mathbf{M}_A$ y $\mathbf{C}_A(\nu)$ son difíciles de calcular tanto por vía analítica, como experimentalmente, por lo que se aproxima la matriz a una estructura diagonal, lo cual es de uso frecuente (Lindegaard, 2003; Skjetne, 2004). Con esta acotación las ecuaciones 2.7 y 2.8 quedan de la siguiente forma (Balanza Llama, 2017):

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{C}_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}\nu \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ Y_{\dot{v}}\nu & -X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.2.3. Amortiguamiento hidrodinámico

De la ecuación 2.3, el componente hidrodinámico más complejo de calcular es la matriz de amortiguamiento $\mathbf{D}(\nu)$. La cual está conformada por distintos términos, que contribuyen al amortiguamiento lineal y al cuadrático, sin embargo, es difícil en general separar estos efectos y por ello se describe, por conveniencia, el amortiguamiento hidrodinámico total como:

$$\mathbf{D}(\nu) = \mathbf{D}_l + \mathbf{D}_n(\nu) \quad (2.11)$$

donde $\mathbf{D}_l$ es la matriz de amortiguamiento lineal y $\mathbf{D}_n(\nu)$ 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 $\mathbf{D}(\nu)$ se reduce a (Balanza Llama, 2017):

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

2.2.4. Modelo de los Actuadores

Por necesidad, se distribuyen las fuerzas generalizadas de control $\boldsymbol{\tau}$ de los actuadores, de embarcaciones marinas, 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:

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (2.13)$$

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:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{rxf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_y I_z - F_x I_y \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Si se expresa $\boldsymbol{\tau}$ de manera compacta como $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{T}\mathbf{f}$ y se sustituye $\mathbf{f}$ por la Ecuación 2.13 el vector de fuerzas y momentos de control $\boldsymbol{\tau}$ para el *Krick Felix* se puede definir de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{|n|n}|n|n \\ k_2\delta_T \\ k_2l_{xT}\delta_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Para determinar los valores de las ganancias (b_1 , b_2 y b_3) es necesario realizar pruebas experimentales, ya que es la única forma en la que pueden ser calculadas. En el *Krick Felix* se tienen dos entradas de control: la deflexión del timón y la fuerza de empuje, las cuales las provocan 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).

Los valores numéricos del modelo dinámico de 3 GDL del bote robótico *Krick Felix* han sido calculado a partir de las características constructivas del vehículo y distintas pruebas experimentales llevadas a cabo con el mismo (Balanza Llama, 2017).

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

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (2.16)$$

Quedando $\mathbf{M}$ determinada como:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0,8163 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0076 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0464 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

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

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) \quad (2.18)$$

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

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & -0,8r & 0,2076v \\ 0,8r & 0 & -0,0163u \\ 0,2076v & -0,0163u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Por lo tanto, la matriz de amortiguamiento $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ del modelo no lineal queda definida como:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = -diag\{-2,2677 - 0,7304|u|, -0,0149, -0,2386\} \quad (2.20)$$

Por último, el vector de fuerzas y momentos de control $\boldsymbol{\tau}$ para el *Krick Felix* queda determinado de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,566 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0,25 \\ 0 & 0,0569 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.4. Modelos linealizados

Las maniobras llevadas a cabo por la embarcación muchas veces son de gran dificultad, por ello 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. Con ello se sacrifica la exactitud en favor de la rapidez de simulación obtenida con el modelo. Con lo que, 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, que fue mostrado en el epígrafe anterior, puede ser desacoplado en varios subsistemas, ya que entre ellos hay poca interacción. Gracias a las propiedades geométricas del *Krick Felix* es posible llevar a cabo esta descomposición.

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

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

$$\text{Velocidad : } X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2) \quad (2.22)$$

$$\text{Desplazamiento lateral : } Y = m(\dot{v} - ur + X_G \dot{r}) \quad (2.23)$$

$$\text{Guiñada : } N = I_z \dot{r} + m X_G (ur + \dot{v}) \quad (2.24)$$

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 2.23 y 2.24 pueden expresarse de manera lineal como:

$$Y = m(\dot{v} - u_0 r) \quad (2.25)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (2.26)$$

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):

$$\dot{\psi} = \frac{s\theta_0}{c\theta_0} q + \frac{c\phi_0}{c\theta_0} r \approx r \quad (2.27)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} & \frac{mu_0}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_3}{I_z - N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.28)$$

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:

$$\frac{r_s}{\delta_T(s)} = \frac{b_3}{(I_z - N_{\dot{r}})s - N_r} \quad (2.29)$$

Donde se define el término de ganancia como $K = \frac{b_3}{-N_r}$ y la constante de tiempo como $T = \frac{I_z - N_r}{-N_r}$. 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):

$$\frac{r_s}{\delta_T(s)} = \frac{0,0437}{0,1945s + 1} \quad (2.30)$$

2.5. Modelado de las corrientes marinas

Las corrientes marinas, son los movimientos que realizan las aguas de los océanos, producidas por la gravedad, la fricción del viento y la variación de la densidad del agua. Ellas constituyen una de las principales perturbaciones que afectan a los vehículos marinos de superficie.

En el sistema de referencia inercial Oe están definidas las corrientes marinas como constantes, irrotacionales y acotadas (Caharija, 2012). En vehículos marinos de superficie se definen por el vector $\mathbf{V}_c = [V_x, V_y, 0]^T$. De aquí que exista un valor constante $V_{max} > 0$ tal que $V_{max} > \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$.

Se puede representar entonces, en el sistema de referencia del vehículo, la velocidad de las corrientes marinas de un fluido irrotacional como:

$$\mathbf{v}_c = [u_c, v_c, 0, 0, 0, 0]^T, \quad (2.31)$$

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

Para tener en cuenta el efecto de las corrientes marinas en el modelo no lineal de 3 GDL del vehículo, se sustituye la velocidad por $\mathbf{v}_r$ (velocidad relativa). De esta forma, se tiene en cuenta la velocidad relativa del vehículo con respecto a las corrientes marinas y se define en el sistema de referencia Ob como:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c, \quad (2.32)$$

donde $\mathbf{v}$ el vector velocidad del vehículo.

Cuando se le agregan las corrientes marinas al modelo, su ecuación queda de la siguiente manera:

$$M\dot{\mathbf{v}}_r + C(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + D(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r = \tau \quad (2.33)$$

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

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^T \mathbf{V}_c, \quad (2.34)$$

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

Se expresa la magnitud de la velocidad de las corrientes como V_{ca} y la dirección en función de dos ángulos, estos son denotados por: (α_c) el ángulo de dirección vertical y (β_c) el ángulo de dirección lateral (β_c) . El vector que representa la velocidad referido al origen del sistema del vehículo es $\mathbf{V}_c = [u_c, v_c, 0]^T$, donde se considera que $\alpha_c = 0$, debido a que

es de interés obtener un modelo bidimensional de las corrientes. Entonces las ecuaciones para calcular los términos de $\mathbf{v}_c$ quedan en función de V_{ca} y de β_c (Fossen, 2011):

$$\mathbf{V}_c = \begin{bmatrix} V_{ca} \cos(\beta_c) \\ V_{ca} \sin(\beta_c) \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Las componentes de velocidad de las corrientes referidas a Ob se calculan mediante la Ecuación 2.34:

$$u_c = V_{ca} \cos(\beta_c - \psi), \quad v_c = V_{ca} \sin(\beta_c - \psi), \quad (2.36)$$

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. Modelado del viento

La incidencia del viento sobre el vehículo se ve determinada a partir del vector fuerzas. Según la Figura 2-2, se puede apreciar que en este modelo se tienen en cuenta tanto la velocidad del viento como el ángulo con el que incide sobre el barco. Matemáticamente, se expresa según la siguiente ecuación (Camero, 2018):

$$\boldsymbol{\tau}_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ N_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 A_T C_X(\gamma_w) \\ \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 A_L C_Y(\gamma_w) \\ \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 L C_N(\gamma_w) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

donde:

- ρ_w representa la densidad del aire.
- A_T , A_L y L definen las áreas transversal y lateral proyectadas por encima de la superficie del agua, así como la longitud del vehículo.
- V_w y β_w representan la velocidad y la dirección del viento, definidas en la Figura 2-2.
- C_X , C_Y y C_N definen los coeficientes de torque y fuerzas aerodinámicas que son calculados en (Camero, 2018).
- V_R y γ_w representan el módulo y dirección de la velocidad del viento relativa al vehículo, definidas en la Figura 2-2.

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

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (2.38)$$

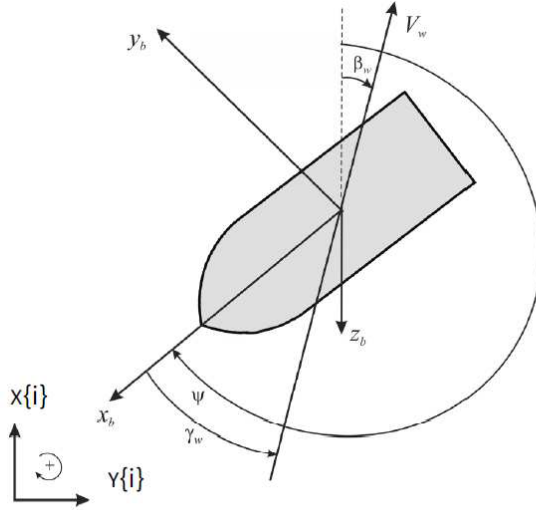


Figura 2-2: Definición de la velocidad del viento V_w , dirección del viento β_w y su ángulo de incidencia γ_w (Camero, 2018).

$$V_R = \sqrt{u_{rW}^2 + v_{rW}^2} \quad (2.39)$$

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

$$\begin{aligned} u_{rW} &= V_w \cos(\beta_w - \psi) \\ v_{rW} &= V_w \sin(\beta_w - \psi) \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.7. Control Predictivo basado en un Modelo

La estrategia de MPC surge en el siglo pasado, en la década de 1960. En sus inicios no fue muy aceptada ni utilizada, por lo que no fue vista como una estrategia novedosa para aquel entonces, sino más bien como un controlador convencional (Maciejowski, 2002). No fue hasta la década de 1970, que empezó a ser utilizada por las industrias petroquímicas y de defensa, las cuales potenciaron el desarrollo y estudio de la misma.

El término Control Predictivo no define una estrategia de control específica, sino a un gran conjunto de métodos de control que se basan completamente en un modelo del proceso a controlar, para así obtener la señal de control minimizando una función objetivo (Camacho, 2010).

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia MPC se representa en la Figura 2-3, y se caracteriza por (Camacho, 2010; Zambrano, 2013):

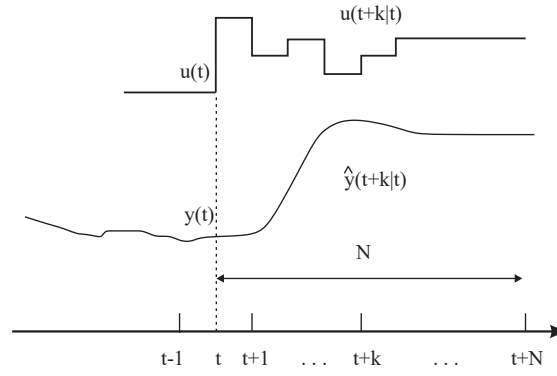
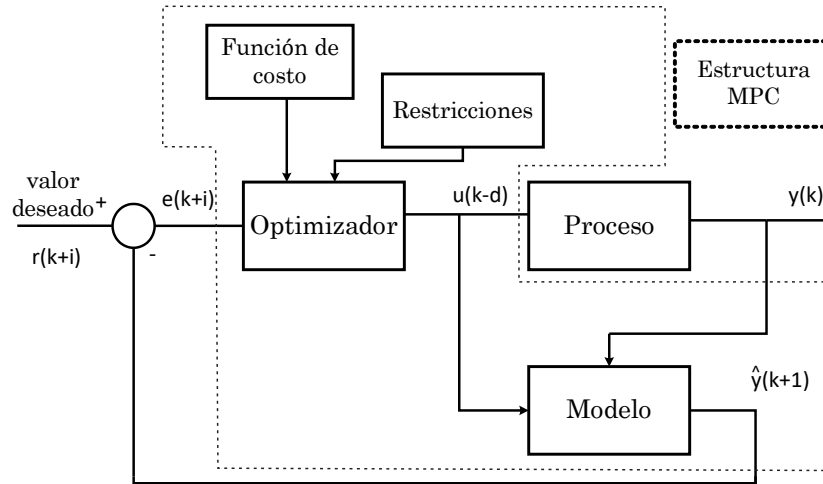


Figura 2-3: Estrategia del MPC.

- Usa el modelo del proceso para predecir las salidas futuras para un horizonte determinado N , llamado horizonte de predicción. Las predicciones de la salida $(t + k|t)$ ¹ para $k = 1 \dots N$ dependen cada una, de los valores conocidos de las entradas y salidas hasta el instante t , también dependen de las señales de control $u(t + k|t)$, $k = 0 \dots N - 1$, que han de ser calculadas y enviadas al sistema.
- Las múltiples señales de control futuras se calculan regulando un criterio, en particular, para mantener el proceso lo más parecido posible a la trayectoria de referencia $r(t + k)$. El mencionado criterio, regularmente tiene forma de una función cuadrática dada por el error que hay entre la salida predicha y la trayectoria de referencia futura. Es costumbre que se incluya el esfuerzo de control dentro de la función objetivo. Este problema tiene una solución explícita, cuando el modelo es lineal y el criterio es cuadrático; en caso contrario se debe usar un método numérico para hallar la solución.
- Al proceso se aplica la señal de control $u(t|t)$, pero las demás señales calculadas no son consideradas, debido a que serán conocidas en el siguiente instante de muestreo $y(t + 1)$ y se repetirán los pasos anteriores con el nuevo valor. Nuevamente se calcula $u(t + 1|t + 1)$, la señal de control, con valores diferentes por lo que es una señal distinta a la del instante anterior.

El esquema de esta estrategia se muestra en la Figura 2-4. Este esquema usa un modelo, de la planta, para predecir la evolución de las salidas del proceso, basándose en las señales de entrada y en las salidas conocidas. Dentro posee un optimizador, que se encarga de calcular las futuras señales de control, para esto tiene en cuenta la función de costo y las futuras restricciones. El modelo usado es esencial, ya que se usa para predecir las futuras salidas por lo que este debe capturar la dinámica del proceso lo más perfecta posible, además de que debe ser lo más sencillo de usar y de comprender posible (Camacho, 2010).

¹Esta notación indica el valor predicho de la variable en el instante $t + k$ que ha sido calculado en el instante t .

Figura 2-4: Estructura básica del *MPC*.

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control. Si la función de costo es cuadrática, el modelo es lineal y no hay restricciones, entonces la solución que se obtiene es explícita. De no ocurrir esto, entonces la solución de la función de costo debe calcularse mediante métodos numéricos, que requieren mayor capacidad de cálculo. El problema resultante dependerá del número de variables, de los horizontes de control y predicción y del número de restricciones (Camacho, 2010).

2.7.1. Selección del modelo de predicción

Lo más común en la práctica es que se usen modelos lineales en la mayoría de los algoritmos *MPC*, lo que hace que las dependencias de las predicciones sobre las opciones de control futuras sean entonces lineales también, esto hace más fácil el proceso a la hora de optimizarlo y también el análisis “*off-line*” del comportamiento esperado del sistema en lazo cerrado. Esto no quita que se usen también los modelos no lineales, ya que hay casos en que la carga computacional que acarrea no sea un problema y que necesariamente tengan que ser usados ya que, las aproximaciones lineales de estos procesos no logran representar de manera precisa la planta.

Como se explica anteriormente, el proceso necesita el modelo para calcular la salida predicha en instantes futuros $y(t+k|t)$. El modelo que se usa, es el adecuado si las predicciones resultantes son precisas. Para disponer de un buen modelo, para la planta, a veces no es necesario reflejar toda la física, la química y el comportamiento interno de la misma, ya que puede entorpecer el trabajo final.

Las diferentes estrategias de *MPC* pueden usar distintos modelos para representar la relación de las salidas con las entradas medibles, algunas de las cuales serán variables manipuladas y otras se pueden considerar como perturbaciones medibles o no medibles. Casi todas las formas posibles de modelar un proceso aparecen en alguna formulación de *MPC*, siendo las más usadas las siguientes (Camacho, 2010; Richalet, 2009):

- Respuesta al impulso.

- Respuesta al paso.
- Modelo de función de transferencia.
- Modelo en el espacio de estado.

2.7.2. Función de costo

La función de costo es la ecuación que se minimiza en cada intervalo de tiempo. Cada variante de *MPC* propone una versión diferente de función de costo para la obtención de la ley de control. Todas tienen en común, que la salida futura en el horizonte de predicción considerado, sea capaz de seguir la señal de referencia al mismo tiempo que se pueda penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. La ecuación general de tal función objetivo se muestra a continuación (Fleites, 2017):

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} Q(j)[\hat{y}(t+j|t) - r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} R(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2.41)$$

donde $\hat{y}$ es la salida estimada, r es la referencia y Δu es la variación del mando. En esta función, los límites del horizonte de predicción están dados por N_1 y N_2 , mientras que N_u indica el horizonte de control. Además, Q y R son, respectivamente, secuencias de ponderación debido a los errores del proceso y al efecto del mando.

Para el caso de los coeficientes de $Q(j)$ y $R(j)$ se suelen usar valores constantes o secuencias exponenciales. Por ejemplo, se puede conseguir un peso exponencial de $Q(j)$ a lo largo del horizonte usando la Ecuación 2.42.

$$Q(j) = \alpha^{N_2-j} \quad (2.42)$$

Para valores de $0 \leq \alpha \leq 1$ se penalizan más aquellos errores que se producen alejados del instante t , que los que ocurren próximos a este, resultado de lo cual se obtiene un control más suave y con menor esfuerzo. Por otra parte si $\alpha > 1$, se penalizan más los primeros errores que se producen, dando como resultado un control más brusco.

La función de costo en la presente investigación, es la brindada por la herramienta *mpcDesigner* de *Matlab*. Está dada por la Ecuación 2.43.

$$J(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \|y(k+i|k) - r(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_R^2 \quad (2.43)$$

2.7.3. Restricciones

Una de las mayores ventajas que ofrece la estrategia de *MPC* es el manejo de las restricciones. Es importante destacar la diferencia que existe entre las restricciones en la entrada o el mando, y las restricciones en la salida controlada. Las primeras representan limitaciones físicas del sistema, siendo impuestas por este en caso de que el controlador no sea capaz de respetarlas. Por otra parte las restricciones en la salida o el mando son consideradas como deseables. El controlador *MPC* es capaz de determinar en tiempo real si será posible completar las tareas de manera satisfactoria, ante la presencia de perturbaciones que afectan el sistema.

En el caso del *Krick Felix*, el vehículo debe realizar el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales garantizando las restricciones en el ángulo de guiñada, véase ecuación 2.44, y teniendo en cuenta las limitaciones de los actuadores como se define en la Ecuación 2.45.

$$-\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2 \quad (2.44)$$

$$-\delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \quad (2.45)$$

2.7.4. Herramienta *mpcDesigner* de *MatLab*

La herramienta *mpcDesigner* permite diseñar y simular distintos tipos de *MPC*. El uso de la misma trae muchas ventajas a la hora de sintonizar los controladores *MPC* ya que se puede cambiar la configuración de los mismos y al mismo tiempo ver las respuestas, que tiene, tanto en las entradas como en las salidas. También, es fácil para controlar los pesos de las variables de salida y los mandos, junto con las restricciones.

Sus principales usos son ([MathWorks, 1984](#)):

- Diseñar controladores *MPC* y validar su ejecución usando escenarios simulados mediante varias iteraciones.
- Obtener modelos lineales de la planta linealizando modelos en el Simulink (requiere Simulink Control Design).
- Revisar los diseños de los controladores en tiempo de ejecución de acuerdo a su estabilidad o para comprobar problemas numéricos.
- Comparar las gráficas de las respuestas para múltiples *MPC*.
- Generar modelos de Simulink con controladores *MPC* y modelos de plantas.

2.8. 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, 2004](#)). En la

Figura 2-5 se muestra como el punto de referencia se encuentra a una distancia L_1 hacia adelante del vehículo.

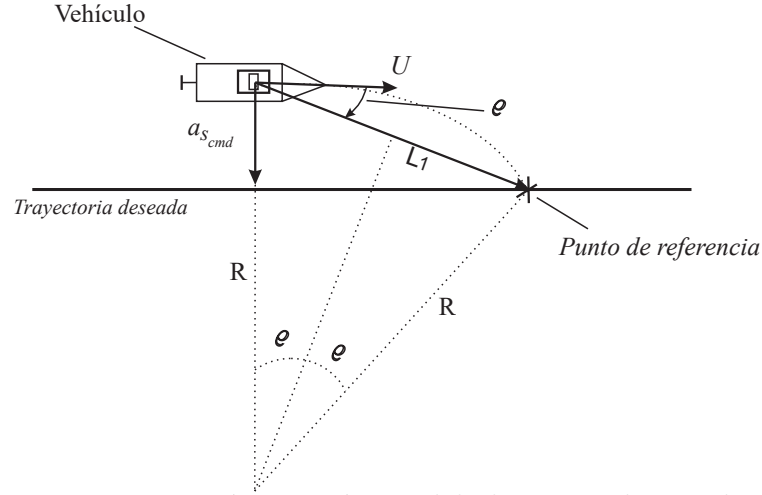


Figura 2-5: Descripción geométrica del algoritmo de guiado NLGL

En la Tabla 2-2 se presentan las variables que intervienen en el algoritmo:

Tabla 2-2: 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 a seguir.
ρ	Ángulo comprendido entre U y la distancia L_1
a_{scmd}	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.

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 2-5.

La aceleración lateral queda definida como:

$$a_{cen} = \frac{U^2}{R} \quad (2.46)$$

Como se aprecia en la Figura 2-5 existe una relación entre la distancia L_1 y R la cual queda expresada geométricamente de la siguiente forma:

$$L_1 = 2R \sin \varrho \quad (2.47)$$

Por lo cual, sustituyendo 2.47 en 2.46 se obtiene la expresión para el comando de aceleración lateral:

$$a_{s_{cmd}} = \frac{U^2}{R} = 2 \frac{U^2}{L_1} \sin \varrho \quad (2.48)$$

De la Ecuación 2.48 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.

Cabe destacar que el comando de aceleración lateral ($a_{s_{cmd}}$) no coincide con ninguno de los estados presente en el modelo presentado anteriormente. Por lo cual, es necesario asociar este comando con alguno de los estados del modelo, en este caso la velocidad angular (r). Teniendo en cuenta la Ecuación 2.46 y sabiendo que existe una relación entre la velocidad angular y la velocidad lineal dada por:

$$U = r \cdot R \quad (2.49)$$

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

$$r_d = \frac{a_{s_{cmd}}}{U} \quad (2.50)$$

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

Como resultado, se obtiene el esquema de guiado que se muestra a continuación Figura 2-6.

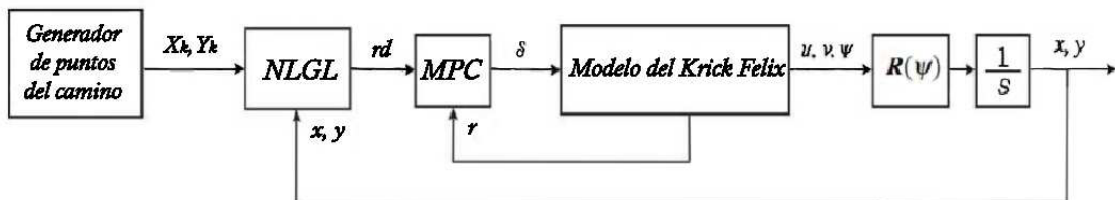


Figura 2-6: Esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL

Como se puede apreciar el esquema consiste en una estructura en cascada que tiene la posición del vehículo como referencia, el error es la entrada hacia el algoritmo de guiado *NLGL* que a su vez da la referencia al controlador *MPC*, el cual es el encargado de darle la señal de giro de timón al vehículo (Hernández Morales, 2016).

2.8.1. Linealización del algoritmo

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:

$$\sin \varrho \approx \varrho = \varrho_1 + \varrho_2 \quad (2.51)$$

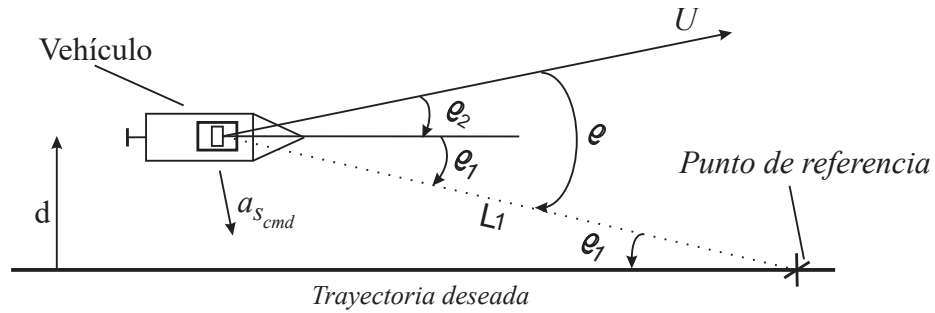


Figura 2-7: Descripción geométrica del algoritmo NLGL para su linealización

De la Figura 2-7 se puede concluir que:

$$\sin \varrho_1 \approx \varrho_1 \approx \frac{d}{L_1} \quad (2.52)$$

$$\sin \varrho_2 \approx \varrho_2 \approx \frac{\dot{d}}{U} \quad (2.53)$$

Combinando las ecuaciones anteriores con la 2.48 se llega a:

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{U^2}{L_1} \sin \varrho \approx 2 \frac{U}{L_1} \left(\dot{d} + \frac{U}{L_1} d \right) \quad (2.54)$$

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 2.54, las ganancias proporcional y derivativa del controlador dependen del valor del módulo de la velocidad del vehículo (U) y de la distancia L_1 .

Partiendo de la linealización descrita el esquema de guiado mostrado en la Figura 2-6 puede ser modificado como se muestra en la Figura 2-8.

A partir de este diagrama se puede apreciar cómo es que las perturbaciones ambientales afectan el sistema. Las corrientes marinas dado que influyen sobre el vector de velocidades del vehículo, o sea sobre la cinemática del mismo, las integraciones necesarias para

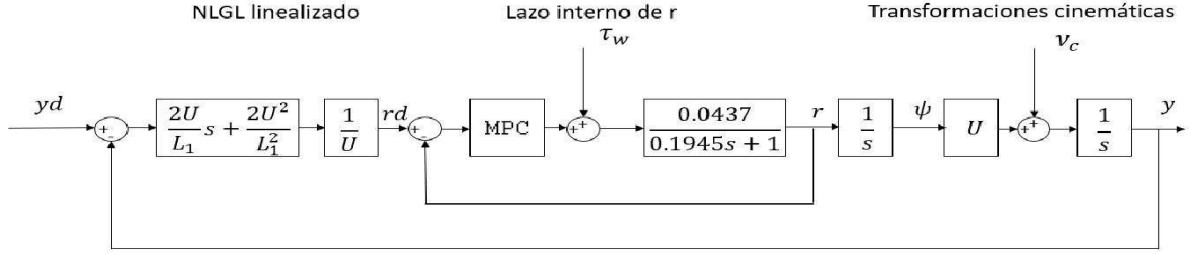


Figura 2–8: Diagrama en bloques del esquema de guiado

las transformaciones cinemáticas hacen posible que no sea necesaria agregar una acción integral para eliminar el efecto perjudicial de las corrientes marinas. El viento por su parte actúa como un torque sobre la embarcación, o sea, sobre la dinámica del vehículo la cual será controlada por el algoritmo *MPC*, que da la opción de controlar disturbios no medidos, para garantizar cero error de seguimiento de camino.

2.9. Consideraciones finales del capítulo

Los modelos dinámicos presentados permitirán el diseño del esquemas de guiado, y la sintonización de los controladores que serán propuesto en este trabajo. Además, el modelo no lineal de 3 GDL del *Krick Felix* presentado en este capítulo, así como el modelo matemático de las perturbaciones marinas que afectan el desempeño del vehículo durante el seguimiento de caminos serán tomados como base para las diferentes pruebas simuladas realizadas durante esta investigación.

El esquema de guiado propuesto presenta una estructura en cascada compuesta por el algoritmo de guiado *NLGL* en lazo principal y un controlador *MPC* para controlar la velocidad angular (r) en el lazo secundario.

Capítulo 3

AJUSTE Y EVALUACIÓN DEL ESQUEMA DE GUIADO BASADO EN *MPC* Y *NLGL*

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de simulación de esta investigación. En un primer momento se presenta el ajuste obtenido del controlador *MPC*. Posteriormente se presentan los resultados de las pruebas simuladas del esquema propuesto primeramente mediante un camino conformado por dos puntos y luego mediante un camino compuesto por varias trayectorias rectas.

3.2. Esquema del sistema controlado

En la Figura 3–1 se presenta el esquema del sistema de control de movimiento para lograr el seguimiento de caminos rectos, sin restricciones temporales, por parte del bote robótico *Krick Felix*.

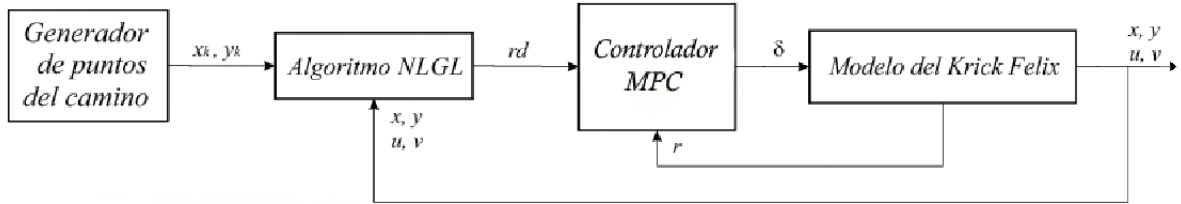


Figura 3–1: Esquema de guiado basado en el algoritmo NLGL con el controlador MPC

En este esquema se muestra primeramente un bloque generador de puntos del camino, llamados *Waypoints* (Wp), el cual se encarga de generar la misión a seguir y para ello entrega la posición (x, y) al algoritmo de guiado *NLGL*, el que la utiliza para tratar de guiar el barco hacia esa posición, mediante el cálculo del ángulo de guiñada deseado para seguir el camino, dando como salida la velocidad angular r , que será la referencia mandada al controlador *MPC*, encargado de manipular el timón del barco, teniendo en cuenta sus restricciones físicas. A continuación, está el modelo matemático del barco, el cual incluye las perturbaciones presentes, las corrientes marinas y el viento.

3.3. Sintonización del controlador MPC

Para representar de forma más aproximada un sistema físico, se usa un modelo no lineal. Su complejidad hace que puedan ser usados para simulaciones, pero no para ajustar los

controladores ya que tienen una mayor dificultad a la hora del ajuste de las alinealidades, por lo tanto es común usar modelos linealizados para el ajuste de los mismos. El modelo usado para sintonizar el controlador *MPC* es la función de transferencia de Nomoto, Ecuación 2.30.

El controlador es diseñado utilizando la herramienta de control predictivo (*mpcDesigner*) del software *Matlab*, presentada en la Sección 2.7.4. El esquema mostrado en la Figura 3–2 muestra cómo el controlador *MPC* maneja las variables de entrada, salida, los disturbios medidos y no medidos, en este caso se toma el viento como una perturbación no medida. Por este motivo el controlador *MPC* es configurado con una entrada de un disturbio no medido, el cual él tiene en cuenta para la salida y es capaz de obtener cero error en estado estable para la variable de salida r .



Figura 3–2: Esquema utilizado para sintonizar el *MPC* con la planta y el disturbio no medido.

Para lograr el comportamiento deseado del sistema se ajustan los parámetros del controlador como se muestra en la Tabla 3–1.

Tabla 3–1: Parámetros de ajuste del controlador *MPC*

Parámetros	Descripción	Valor
T	período de muestreo	0,1 s
P	horizonte de predicción	100
M	horizonte de control	20
R	peso en el mando	0
Q	peso en la salida	1

El período de muestreo seleccionado es $T=0.1$, debido a que es el período de muestreo que utiliza el hardware Arduino, Pixhawk Px4 mencionado en la Sección 1.3, que tiene el barco. El horizonte de predicción seleccionado es alto, para poder obtener un rendimiento comparable al de la estimación completa de la información (Rawlings and Mayne, 2015).

El horizonte de control fue seleccionado siguiendo el criterio $5 \leq N_u \leq 20$, teniendo en cuenta que si este número es más grande la señal de control puede hacerse más agresiva,

lo que causaría un incremento en el esfuerzo computacional (Seborg, 2010). Los pesos en el mando y en la salida, dados por las matrices Q y R se ajustaron con el fin de que se cumplieran de manera satisfactoria los requisitos establecidos para la respuesta transitoria del sistema. En cuanto a las restricciones, no hay en la salida pero sí en el mando debido a las limitaciones físicas del timón, las cuales se tienen en cuenta en el diseño de este controlador y se pueden ver en la Ecuación 3.1.

$$-\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{6} \quad (rad) \quad (3.1)$$

Ajustando el controlador con los valores anteriores, fue probado en un sistema simple con una entrada paso en la referencia y una perturbación no medida, también un paso, como se ve en la Figura 3-3.

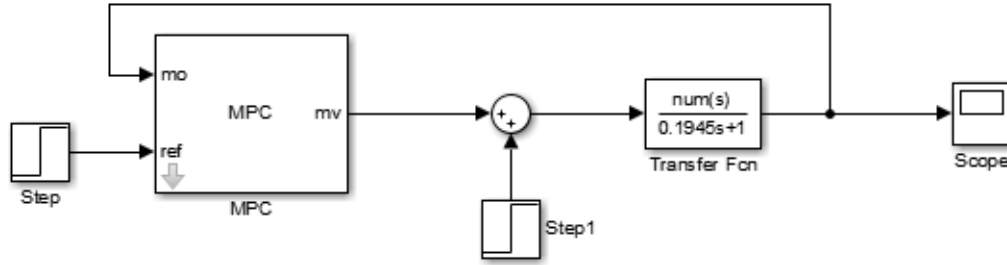


Figura 3-3: Ajuste del controlador *MPC* en un lazo de control simple

Como se observa en la Figura 3-4, el controlador *MPC* es capaz de responder perfectamente al paso en presencia de una perturbación no medida, usando los valores mostrados anteriormente en la Tabla 3-1. En esta se ve que la respuesta presenta un pequeño tiempo de establecimiento y que no hay error en estado estable.

3.4. Resultados de las simulaciones

Las simulaciones se basaron en el esquema mostrado en la Figura 3-1, y su implementación en *MatLab*, utilizando la configuración del *MPC* mostrada anteriormente. El algoritmo *NLGL* fue implementado anteriormente en *Arduino* y los parámetros de configuración del mismo definidos 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, los mismos son definidos como 8 y 0.75 respectivamente, valores recomendados por (ArduPilot, 2019). Ambos se utilizan para el cálculo de la distancia L_1 mediante la siguiente ecuación (Mesa, 2018; Hernández Morales, 2019):

$$L_1 = \frac{\varphi \cdot T \cdot U}{\pi} \quad (3.2)$$

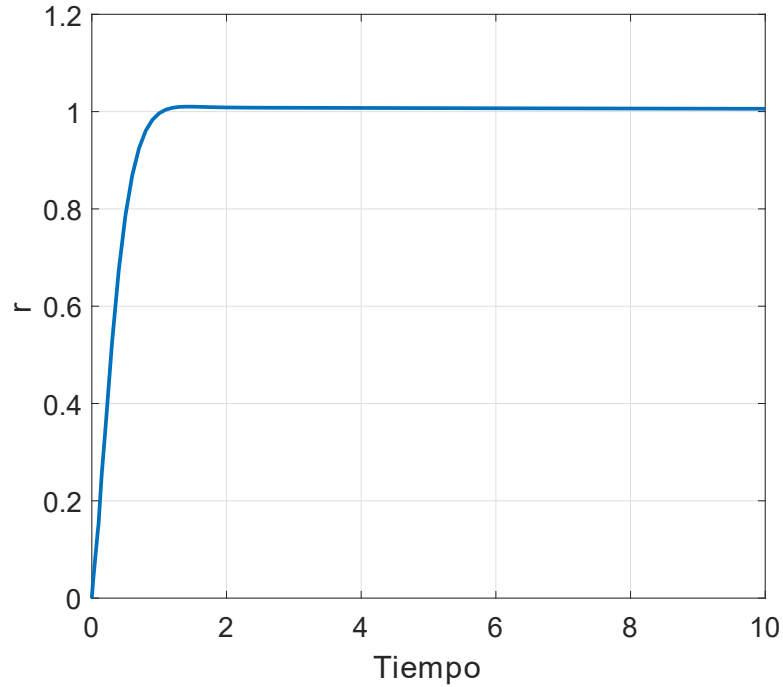


Figura 3–4: Respuesta al paso del controlador *MPC* con una perturbación no medida

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.

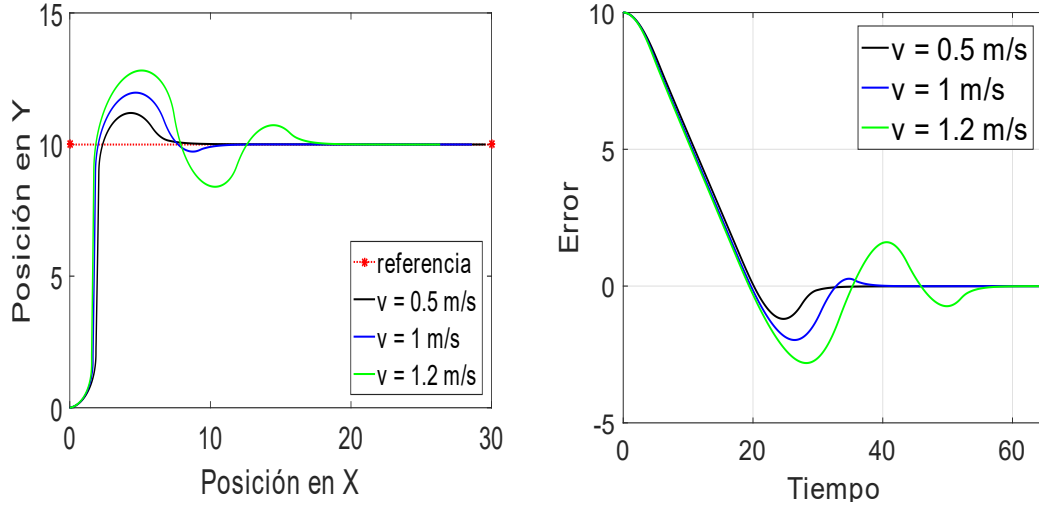
3.4.1. Evaluación de seguimiento para un camino simple

Primeramente se muestra como el controlador *MPC*, en cascada con el algoritmo de guiado *NLGL*, es capaz de atacar el efecto del viento sobre la pequeña embarcación *Krick Felix*. Se prueba con varios valores de la velocidad del viento y el ángulo de incidencia se mantiene constante y perpendicular a la trayectoria, que sería el caso que más difícil sería de contrarrestar Figura 3–5. El camino escogido está formado por dos puntos, $\mathbf{x} = [0 \ 30]$ y $\mathbf{y} = [10 \ 10]$, con el objetivo de minimizar el tiempo.

Bajo estas condiciones el viento empuja la pequeña embarcación fuera de su trayectoria, pero el controlador *MPC* es capaz de hacerla regresar y estabilizarla en la trayectoria prevista. En los tres casos estudiados el error de seguimiento de caminos es cero, en estado estable. La respuesta de la variable manipulada se puede ver en la Figura 3–6, viendo así como varía teniendo en cuenta sus restricciones.

3.4.2. Evaluación de seguimiento para un camino formado por varios tramos rectos

El camino que se propone a seguir tiene 5 puntos, con giros para comprobar el control del camino ante las restricciones físicas del barco en presencia de perturbaciones marinas. Los puntos para la misión se muestran en la Tabla 3–2.



(a) Seguimiento del camino simple

(b) Error de seguimiento

Figura 3-5: Seguimiento de un camino de dos puntos en presencia de varios valores de la velocidad del viento

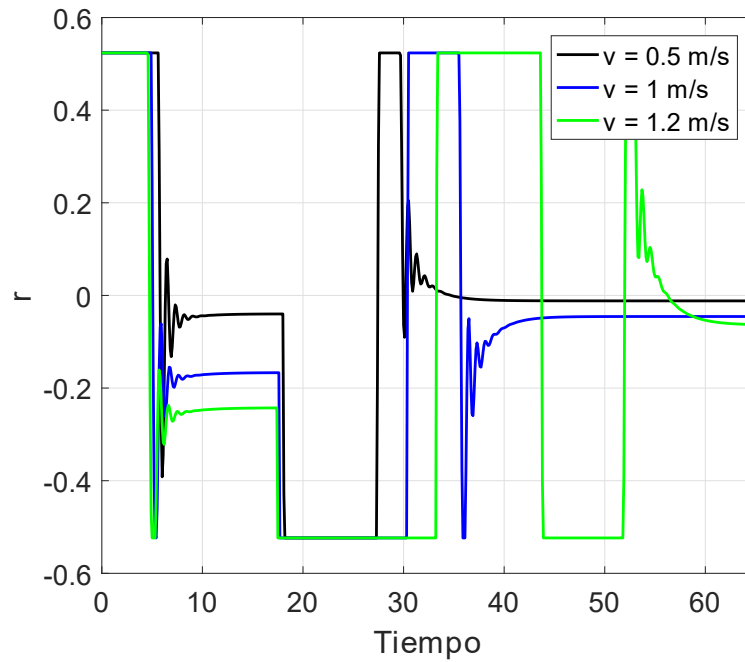


Figura 3-6: Variación del ángulo de timón durante la trayectoria simple

Tabla 3-2: Puntos del camino

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
x(m)	0	20	100	70	10
y(m)	20	60	50	10	15

En la Figura 3-7 se muestra como el vehículo es capaz de cumplir la misión siendo afectado por una corriente de magnitud constante: $V_{ca} = 0.1$ m/s y $\beta_c = 10^\circ$, para las corrientes, y para el viento: $V_w = 0.5$ m/s y $\beta_w = 270^\circ$ partiendo de una posición distante al punto

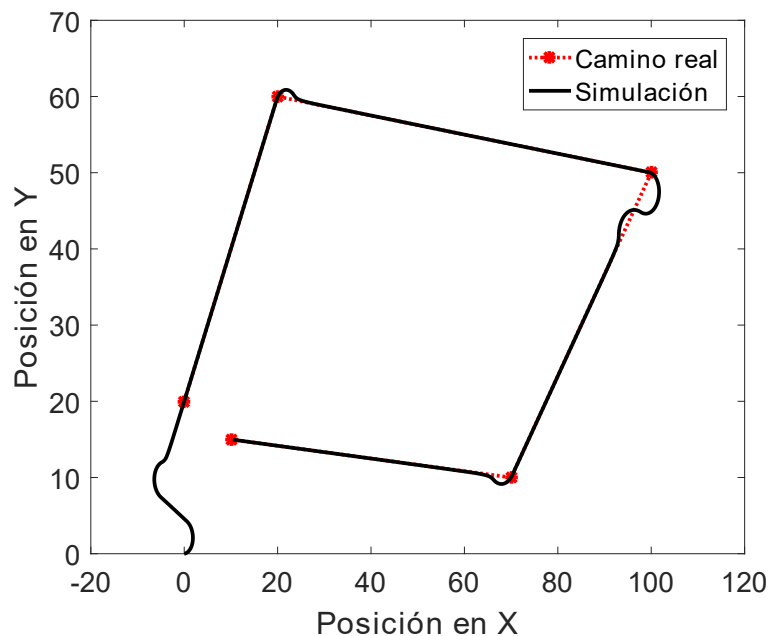


Figura 3–7: Seguimiento de un camino formado por varios tramos rectos por parte del bote robótico *Krick Felix*

inicial. En la Figura 3–8 se ve como la acción del algoritmo de guiado en cascada con el controlador *MPC* hace que el error de seguimiento tienda a cero rápidamente, los picos ocurren en los lugares donde la trayectoria cambia bruscamente. En la Figura 3–9 se puede ver como es la salida de timón durante el recorrido que realiza el barco, los cambio bruscos ocurren al cambiar de dirección.

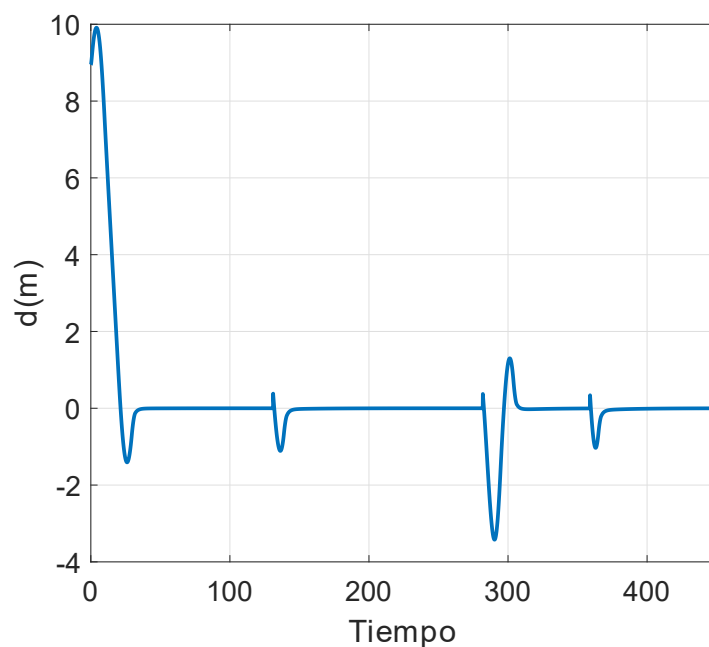


Figura 3–8: Error en el timón en el seguimiento de caminos rectos por parte del bote robótico *Krick Felix*

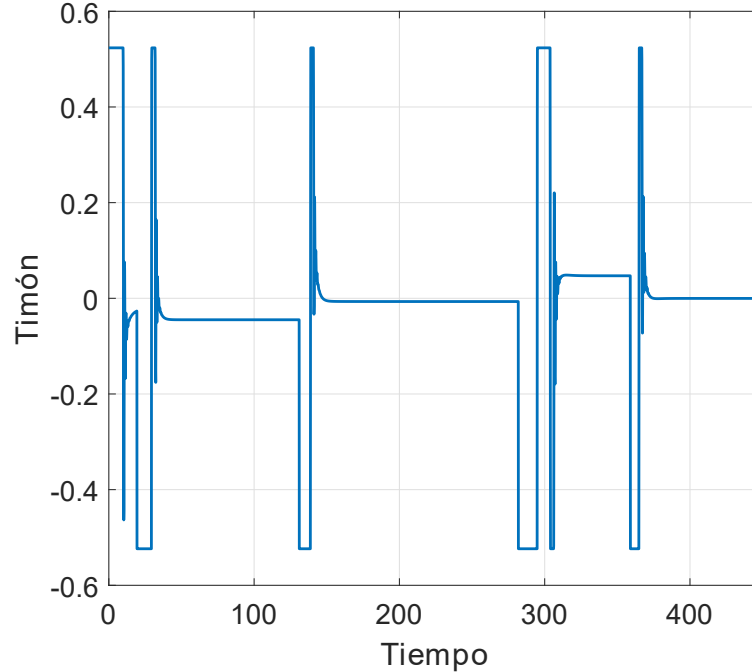


Figura 3–9: Cambios en el ángulo del timón con respecto al tiempo.

Los resultado de estas simulaciones demuestran que el algoritmo de guiado *NLGL* en cascada con el controlador *MPC* es capaz de seguir el camino teniendo en cuenta las restricciones físicas de la embarcación *Krick Felix*, y en presencia de perturbaciones medioambientales, las corrientes marinas y el viento, obteniendo cero error en estado estable, en los casos presentados.

3.5. 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 Tabla 3–3. El precio total es pequeño comparado con el de un autopiloto comercial que sobrepasa fácilmente los mil dólares.

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

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

El desarrollo y el uso de los mismos, en nuestro país, traería sin lugar a dudas beneficios tanto económicos como medioambientales, debido a que Cuba es un país rodeado de mar, la industria marítima es esencial para su desarrollo económico. Un ejemplo de ello sería usar estos vehículos para la exploración de las zonas de pesca existentes, haciendo esto se ahorraría en combustible, ya que no sería necesario enviar barcos mayores, que necesitan combustible para poder trabajar, y también se ahorraría en recursos humanos y financieros al no tener que enviar una tripulación a realizar estas labores, ya que sería posible hacerla con la pequeña embarcación. Facilitaría el reconocimiento de mejores lugares para el comienzo de la temporada pesquera en nuestro archipiélago, dotándola de análisis estadísticos según los datos recogidos por los sensores que puedan tener a bordo los vehículos marinos no tripulados. Su uso sería aprovechado en zonas con mayor diversidad y productividad como lagunas costeras, manglares, arrecifes rocosos o coralinos y zonas de surgencias. Desde un punto de vista socio-económico este proyecto permite evaluar los principales parámetros ecológico-pesqueros de las existencias de especies aprovechables, estudiar las poblaciones de recursos vivos marinos y la posibilidad de cultivar aquellos susceptibles de serlo, para así mejorar su gestión y aprovechamiento.

3.6. Consideraciones finales del capítulo

El esquema de guiado basado en el algoritmo de guiado *NLGL* en cascada con el controlador *MPC* asegura la convergencia y precisión durante el seguimiento de caminos rectos garantizando cero error ante la influencia de corrientes marinas y viento, teniendo en cuenta las restricciones físicas de los actuadores, lo cual queda demostrado a partir de los resultados de las pruebas simuladas.

CONCLUSIONES

Como resultado final arrojado por esta investigación, se presenta un esquema de guiado basado en el algoritmo *NLGL* en cascada con un controlador *MPC* que garantiza precisión durante el seguimiento de caminos rectos para el *Krick Felix* en presencia de perturbaciones medioambientales, teniendo en cuenta las restricciones asociadas a los actuadores del vehículo. Lo cual quedó demostrado mediante simulaciones. Esta afirmación general queda complementada con las siguientes conclusiones:

- Usando como base los estudios realizados de la literatura especializada, se establece que el controlador *MPC* en conjunto con un algoritmo de guiado, en este caso el *NLGL*, es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de caminos rectos.
- Queda definido un esquema de guiado que presenta una estructura en cascada, donde el lazo externo está compuesto por el algoritmo *NLGL* y el interno por un controlador *MPC*.
- Se realizó el ajuste del controlador *MPC* a partir del modelo de primer orden de Nomoto, teniendo en cuenta las restricciones físicas de los actuadores.
- Mediante simulación se ha podido comprobar que el esquema de guiado propuesto en esta investigación asegura cero error en estado estable en el seguimiento de caminos rectos, en presencia de múltiples perturbaciones medioambientales.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar la estrategia de guiado *NLGL* en cascada con el controlador *MPC* en la práctica.
- Continuar con el estudio del control *MPC* para ser aplicado posteriormente en un vehículo aéreo no tripulado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, P. C., Botelho J. Góis P. Pascoal A. Ribeiro J. Ribeiro M. Rufino M. Sebastião L. Silva H. (2016). The medusa class of autonomous marine vehicles and their role in eu projects.. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS*. pp. 1–10.
- ArduPilot (2019). Mission planner overview. Página web: planner.ardupilot.com: (acceso marzo 2019).
- Arshad, M. R.; Radzak, M. Y. (2004). Design and development of an autonomous underwater vehicle test-bed (usm-auv i).. *8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference. ICARCV*. **1**, 257–260.
- Balanza Llama, C. (2017). Modelado dinámico del barco de pequeño porte krick felix. *Trabajo de Diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba*.
- Banazadeh, A.; Ghorbani, M. T. (2013). Frequency domain identification of the nomoto model to facilitate kalman filter estimation and pid heading control of a patrol vessel. *Ocean Engineering* **72**, 344–355.
- Bock, H. G.; Diehl, M.; Schlöder J. P.; Allgöwer F.; Findeisen R.; Nagy Z. (2000). Real-time optimization and nonlinear model predictive control of processes governed by differential-algebraic equations. *IFAC Proceedings Volumes* **33**(10), 671–679.
- Borhaug, E.; Pavlov, A.; Pettersen K. Y. (2008). Integral los control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents. In: *47th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE Xplore. Cancun, Mexico. pp. 4984 – 4991.
- Breivik, M. (2010). Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles. PhD thesis. NTNU.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2009). *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.; 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.

- Caldwell, C. V.; Collins, E. G.; Palanki S. (2006). Integrated guidance and control of auvs using shrinking horizon model predictive control. In: *OCEANS 2006*. IEEE. pp. 1–6.
- Camacho, E. F.; Bordons, C. (2010). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial (RIAI)* **1**(3), 5–28.
- Camero, A. A. (2018). Esquema de guiado para el seguimiento de caminos sin restricciones temporales por parte del barco krick felix en presencia de múltiples perturbaciones. *Trabajo de Diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.*
- Chavez, J.; Picado, A.; Steller J. M. (2005). Aplicaciones de control en barcos. Technical report. Universidad de Costa Rica.
- Chen, W.; Wei, Y.; Zeng J.; Han H.; Jia X. (2016). Adaptive terminal sliding mode ndo-based control of underactuated auv in vertical plane. *Discrete Dynamics in Nature and Society 2016* pp. 1–9.
- 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.
- Findeisen, R.; Allgöwer, F.; Biegler L. T. (2007). *Assessment and future directions of nonlinear model predictive control*. Vol. 358. Springer.
- Fleites, R. (2017). Estrategia de control MPC para el seguimiento de caminos formados por líneas rectas para el HRC-AUV. Trabajo de diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- 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.
- 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, A. (2014). Estrategia de control para el seguimiento de camino de un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Hernández Morales, L. E. (2016). Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en vehículos autónomos. Trabajo de diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

- Hernández Morales, L. E. (2019). Esquema de guiado basado en el algoritmo nlgl para es seguimiento de caminos rectos en vehículos marinos. Master's thesis. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara.
- Jalving, B. (1994). The *ndre – auv* flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **19**(4), 497–501.
- Lakhekar, G. V.; Waghmare, L. M.; Londhe P. S. (2015). Enhanced dynamic fuzzy sliding mode controller for autonomous underwater vehicles. *Underwater Technology. IEEE* pp. 1–7.
- Lekkas, A. M. (2014). Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- 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*.
- Li, Z., Sun J. (2012). Disturbance compensating model predictive control with application to ship heading control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **20** pp. 257–265.
- Lindegaard, K. (2003). Acceleration feedback in dynamic positioning. Tesis doctoral. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Noruega.
- Maciejowski, J. M. (2002). *Predictive control: with constraints*. Pearson education.
- Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*. IEEE. pp. 1–4.
- MathWorks (1984). Design and simulate model predictive controllers. Página web: la.mathworks.com (acceso mayo 2019).
- Mayne, D. Q.; Rawlings, J. B.; Rao C. V.; Sokaert P. O. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica* **36**(6), 789–814.
- Medina, Yunier Valeriano, Alexei Fernandez Tkachova, Luis Hernandez Santana and Pablo Jose Prieto Entenza (2016). Yaw controller in sliding mode for underwater autonomous vehicle. *IEEE Latin America Transactions* **14**(3), 1213–1220.
- Mesa, E. (2018). Esquema de guiado NLGL aplicado al vehículo marino Krick Felix. Trabajo de diploma. UCLV. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- 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.; Muñoz R.; Díaz 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. (2002). Model predictive control of an autonomous underwater vehicle. In: *Proceedings of UKACC 2002 Postgraduate Symposium, Sheffield, UK, September*. Citeseer. pp. 19–23.
- Oh, S. R.; Sun, J. (2010). Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control. *Ocean Engineering* **37**(2-3), 289–295.
- Park, S.; Deyst, J.; How J. (2004). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. In: *AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit*. p. 4900.
- Pavlov, A.; Nordahl, H.; Breivik M. (2009). Mpc-based optimal path following for underactuated vessels. In: *8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. IFAC. Guarujá, Brasil. pp. 340–345.
- 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.; Nijmeijer, H. (2001). Underactuated ship tracking control: theory and experiments. *International Journal of Control* **74**(14), 1435–1446.
- Qi, D.; Feng, J.; Yang J. (2016). Longitudinal motion control of auv based on fuzzy sliding mode method. *Journal of Control Science and Engineering* **2016**, 5.
- Rawlings, J. B. and D. Q. Mayne (2015). *Model predictive control: Theory and design*. Nob Hill Pub. Madison, Wisconsin.
- Richalet, J.; O'Donovan, D. (2009). *Predictive Functional Control*. Advances in Industrial Control. Springer London. London.
- Rout, R. (2017a). Design and Experimental Realization of Adaptive Control Schemes for an Autonomous Underwater Vehicle. PhD thesis. National Institute Of Technology Rourkela. Rourkela, India.
- Rout, R.; Subudhi, B. (2017b). Inverse optimal self-tuning pid control design for an autonomous underwater vehicle.. *International Journal of Systems Science* **48**(2), 367–375.
- Scokaert, Pierre OM and DQ Mayne (1998). Min-max feedback model predictive control for constrained linear systems. *IEEE Transactions on Automatic control* **43**(8), 1136–1142.
- Seborg, D. E.; Mellichamp, D. A.; Edgar T. F.; Doyle F. J. (2010). *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos.
- 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.
- Shen, Chao (2018). Motion control of autonomous underwater vehicles using advanced model predictive control strategy. PhD thesis. UCA.
- 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.

- Skjetne, R.; Smogeli, O.; Fossen T. (2004). A nonlinear ship manoeuvring model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship. *Modeling, Identification and control* **25**(1), 3–27.
- 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.
- Song, Y. S. and M. R. Arshad (2015). Sliding mode depth control of a hovering autonomous underwater vehicle. In: *2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*. IEEE. pp. 435–440.
- Sotnikova, M (2012). Ship dynamics control using predictive models. *IFAC Proceedings Volumes* **45**(27), 250–255.
- Steenenson, L. V.; Turnock, S. R.; Phillips A. B.; Harris C.; Furlong M. E.; Rogers E.; Wang L.; Bodles K.; Evans D. W. (2014). Model predictive control of a hybrid autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* **228**(2), 166–179.
- 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.
- Sveen, A. D. (2003). Robust and adaptive tracking control of surface vessel for synchronization with an rovs: Practical implementation on cybership ii. mathesis. NTNU.
- Valeriano-Medina, Y. (2013a). Modelado dinámico de un vehículo autónomo subacuático. Master's thesis. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli H.; Rodríguez Y.; Cañizares J. R. (2013b). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences* **19**(2), 175–200.
- Valeriano, 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.
- 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.
- Zambrano, J.; González, A. (2013). Implementación de un algoritmo de control predictivo en espacio de estados sobre una plataforma de simulación desarrollada en matlab.

- Ingenius* (9), 5–14.
- Zhang, F.; Tan, X. (2013). Gliding robotic fish and its tail-enabled yaw motion stabilization using sliding mode control. *ASME Dynamic Systems and Control Conference. The American Society of Mechanical Engineers* pp. 1–10.
- Zheng, Huarong, Rudy R Negenborn and Gabriel Lodewijks (2014). Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control. *IFAC Proceedings Volumes* **47**(3), 8812–8818.
- Zheng, Z.; Sun, L. (2016). Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation. *Neurocomputing* **177**, 158–167.