

**Esquema de guiado para el seguimiento de caminos por parte del barco *Krick Felix* bajo la influencia de múltiples perturbaciones.
(Guidance scheme for track tracking by the ship *Krick Felix* under the influence of multiple disturbances)**

Leidys Miranda Jiménez, Yunier Valeriano Medina

^a*Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas*

^b*Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas*

Resumen

Los vehículos autónomos de superficie (USV) pertenece a la familia de los vehículos autónomos, dentro de su estructura se puede encontrar un sistema de guiado, un sistema de navegación y un sistema de control. El sistema de guiado juega un papel vital en el cumplimiento de misiones sin intervención humana. La siguiente investigación presenta el diseño de un esquema guiado, formado por un controlador *I-LOS*, con el fin de lograr la convergencia y el seguimiento preciso de caminos rectos a pesar de la presencia de varias perturbaciones como es el caso de las corrientes marinas y el viento. El ajuste de las ganancias del controlador se realiza de acuerdo con las características del vehículo y la geometría del camino a seguir. El algoritmo de guiado propuesto se evalúa mediante simulación.

Palabras clave: Vehículos autónomos de superficie; guiado; Controlador I-LOS.

1. Introducción

Los vehículos marinos en su clasificación incluyen barcos, semi-sumergibles, submarinos, vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV) o autónomamente (AUV), torpedos, vehículos autónomos de superficie y otras estructuras propulsadas y energizadas, capacitadas para navegar (Fossen, 2011). Entre sus aplicaciones se destacan en actividades como la pesca, en aplicaciones militares, como medio de

Email address: lemiranda@uclv.cu (Leidys Miranda Jiménez).

transporte, en tareas de reconocimiento y vigilancia de las costas marinas o en el estudio del entorno marino. Específicamente los vehículos autónomos de superficie (USV) tienen como principal ventaja que no requieren intervención humana, permitiendo realizar misiones con un alto grado de complejidad y exactitud. Toda embarcación de este tipo presenta un sistema de control de movimiento que le permite operar de forma autónoma. Este está compuesto por un sistema de guiado, un sistema de navegación y un sistema de control. El principal interés de esta investigación está en el sistema de guiado ya que su objetivo radica en proporcionar de forma continua al controlador el estado de las referencias necesarias (posición, velocidad y aceleración) para que el vehículo recorra la ruta precisa (Lekkas, 2014).

El seguimiento de camino sin restricciones temporales (*path following*, en inglés) constituye un escenario de control de movimiento, donde el objetivo de control es converger y seguir un camino geométrico previamente definido, sin considerar restricción temporal alguna. Numerosas son las soluciones de guiado y control que se proponen para este tipo de escenario (Breivik, 2008). En un número importante de trabajos se emplea la estrategia de guiado conocida como línea de visión (*line of sight, LOS*) (Breivik, 2008; Fossen, 2002).

En Cuba, el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (*GARP*), de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, trabaja en el estudio de vehículos marinos, específicamente en las temáticas de modelado, control y guiado. En investigaciones precedentes, los investigadores del *GARP* demuestran que la estrategia *LOS* no es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de caminos en presencia de corrientes marinas. Es por ello que proponen incorporar una acción integral en la ley de guiado con el propósito de contrarrestar el efecto de las corrientes marinas durante el seguimiento de caminos por parte del vehículo sumergible *HRC-AUV* (Hernández-Julián, 2016; Valeriano-Medina, 2015).

Actualmente una de las líneas de investigación del grupo está enmarcada en el desarrollo del barco robótico *Krick Felix*. El propósito con este vehículo es contar con una maqueta donde se puedan probar algoritmos de control, guiado y navegación con el fin de extender las posibilidades de maniobrabilidad durante el desarrollo de diferentes misiones. El *Krick Felix* es un vehículo sub-actuado, pues posee menos entradas de control que grados de libertad a controlar, lo cual, unido a las no linealidades que caracterizan su dinámica, y las afectaciones que provocan tanto las corrientes marinas y el viento en su comportamiento, hacen necesario que en el mismo se utilice una solución de guiado que asegure precisión durante el seguimiento de caminos rectos.

2. Modelo Matemático

El *Krick Felix* (Figura 1) es un modelo a escala de un buque del puerto de Hamburgo, en Alemania. Para su movimiento cuenta con un motor eléctrico y una propela acoplada, así como del equipamiento necesario que lo convierte en un bote robótico. Las principales especificaciones geométricas de la embarcación se muestran en el Cuadro 1, las cuales tienen incidencia en el modelado y control del vehículo.

Los movimientos de traslación y posición de un vehículo marino tradicionalmente se representan utilizando varias expresiones, lo que trae como resultado complicados modelos formados por cientos de elementos. Las maniobras que se pueden realizar en las embarcaciones marinas abarcan los movimientos



Figura 1. Barco robótico *Krick Felix*.

Cuadro 1

Datos geométricos, físicos e inerciales del *Krick Felix* (Valeriano, 2017a).

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

en los seis grados de libertad (6 GDL). Los grados de libertad están determinados por los desplazamientos independientes y rotaciones que especifican totalmente la posición y orientación del vehículo (Fossen, 2011).

En el Cuadro 2 se expone la nomenclatura estándar empleada en la descripción del movimiento de los vehículos marinos (SNAME, 1950). Donde la guiñada es el grado de libertad más importante en el diseño de controladores de dirección.

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

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

Cuadro 2

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

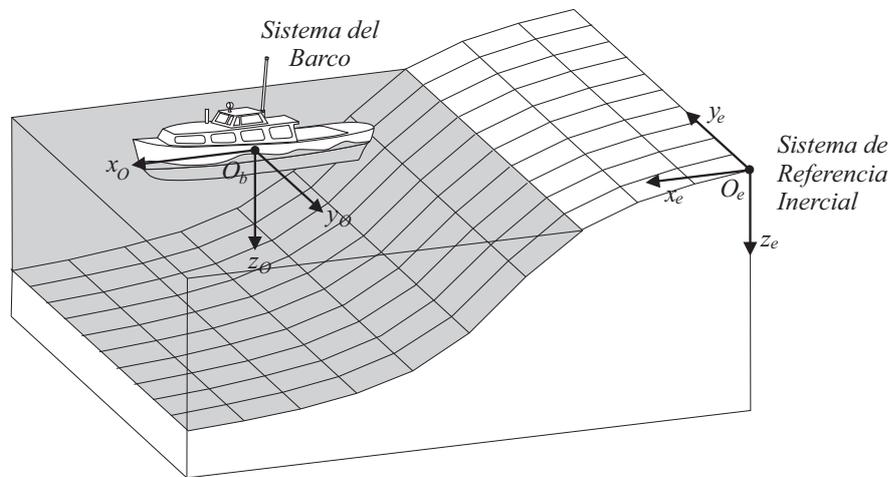


Figura 2. Sistemas de Coordenadas.

$$\mathbf{v} = [u, v, r]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [X, Y, N]^T \quad (3)$$

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

Las ecuaciones cinemáticas son aquellas expresiones que relacionan la derivada de la posición y la velocidad de un cuerpo rígido. Dichas ecuaciones se pueden expresar en forma matricial utilizando las transformaciones de ángulos de *Euler* como (Fossen, 2006):

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v} \quad (4)$$

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

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$\underbrace{\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{\mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}_{\text{términos hidrostáticos}} = \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

Las corrientes marinas, son movimientos superficiales de las aguas de los océanos, producidas por la gravedad, la fricción del viento y la variación de la densidad del agua. Las corrientes marinas constituyen una de las principales perturbaciones que afectan a los vehículos marinos de superficie durante la navegación. Otro tipo de perturbaciones alrededor de un robot marítimo en operación son las fuerzas del viento. Se consideran en este caso como perturbaciones externas y actuantes en cada uno de los ejes del sistema de coordenadas del vehículo (x_0, y_0, z_0) . Para ello, con el objetivo de alcanzar una mayor precisión en el modelo del *Krick Felix*, a la ecuación 6 se le incorporan los términos relativos a las corrientes marinas y el viento quedando como sigue:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_W \quad (7)$$

En esta ecuación:

- $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$, es la matriz de inercia incluyendo las masas añadidas.
- $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)$, es la matriz que incluye los términos de Coriolis del cuerpo rígido y de las masas añadidas.
- $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$, es la matriz de amortiguamiento.
- $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$, es el vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad.
- $\boldsymbol{\tau} = [\tau_X, \tau_Y, \tau_N]^T$, representa el vector de fuerzas y momentos de las entradas de control.
- \mathbf{v}_r , velocidad relativa del vehículo con respecto a las corrientes.
- $\boldsymbol{\tau}_W$, vector fuerza y momento que provoca el viento.

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

El término \mathbf{v}_r representa la velocidad relativa del vehículo con respecto a las corrientes y queda definido como:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{V}_c \quad (8)$$

Donde \mathbf{v} es el vector velocidad del vehículo definido en la ecuación 1 y el vector que representa la velocidad de las corrientes referido al origen del sistema del vehículo es $\mathbf{V}_c = [u_c, v_c, 0]^T$ considerando que las mismas no generan movimientos rotacionales en el vehículo. Las componentes u_c y v_c , referidas al sistema inercial, pueden ser calculadas a partir del módulo de la velocidad de las corrientes (V_{ca}) y el ángulo de dirección que poseen (β_c):

$$u_c^E = V_{ca} \cos \beta_c \quad v_c^E = V_{ca} \sin \beta_c \quad (9)$$

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

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

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

$$u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi) \quad (10)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi) \quad (11)$$

La incidencia del viento sobre el vehículo se ve determinado a partir del vector fuerza $\boldsymbol{\tau}_w$, en este modelo se tienen en cuenta tanto la velocidad del viento como el ángulo con el que incide sobre el barco, expresándose de la siguiente manera (Caharija, 2014):

$$\boldsymbol{\tau}_w = \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ N_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 A_T C_X(\gamma_w) \\ \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 A_L C_Y(\gamma_w) \\ \frac{1}{2} \rho_w V_R^2 L C_N(\gamma_w) \end{bmatrix} \quad (12)$$

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 3.
- C_X , C_Y y C_N definen los coeficientes de torque y fuerzas aerodinámicas.
- V_R y γ_w representan el módulo y dirección de la velocidad del viento relativa al vehículo, definidas en la Figura 3.

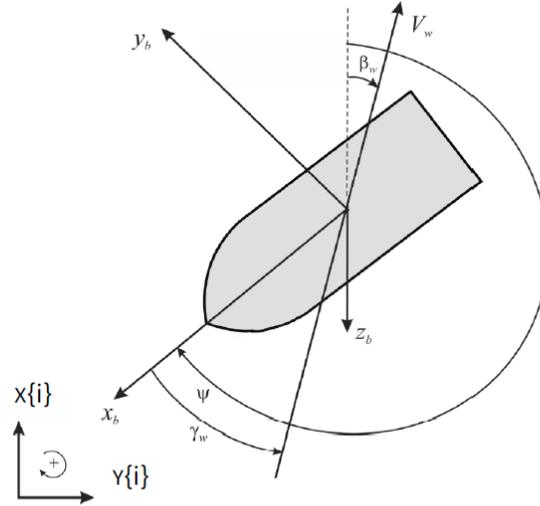


Figura 3. Definición de la velocidad del viento V_w , dirección del viento β_w y su ángulo de incidencia γ_w (Fossen, 2011).

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

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (13)$$

$$V_R = \sqrt{u_{rW}^2 + v_{rW}^2} \quad (14)$$

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

$$u_{rW} = V_w \cos(\beta_w - \psi) \quad (15)$$

$$v_{rW} = V_w \sin(\beta_w - \psi)$$

El modelo expresado mediante la ecuación 7 constituye la representación matemática más exacta del vehículo, por lo cual se emplea en simulación para evaluar el desempeño del esquema de guiado.

3. Modelo lineal para el subsistema lateral

Para que un vehículo de superficie realice diversas maniobras en entornos donde las perturbaciones marinas son afectaciones constantes, resulta poco práctico el uso de un modelo detallado de la embarcación.

Por tal motivo la ecuación 6 no resulta útil para el diseño de controladores convencionales y desacoplados en un USV. Para ello una alternativa consiste en dividir el sistema en subsistemas entre los cuales exista poca interacción. El objetivo de esta opción es alcanzar mayor rapidez en las simulaciones que en las maniobras de tiempo real, lo cual es especialmente importante para propósitos de predicción dinámica (Fossen, 2002; Sutulo, 2002). Esta descomposición es posible llevarla a cabo debido a las propiedades geométricas y al alto grado de simetría con que cuenta el *Krick Felix*.

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

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

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

$$\text{Velocidad : } X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2) \quad (16)$$

$$\text{Desplazamiento lateral : } Y = m(\dot{v} - ur + X_G \dot{r}) \quad (17)$$

$$\text{Guiñada : } N = I_z \dot{r} + m X_G (ur + \dot{v}) \quad (18)$$

La ecuación 16 (movimiento longitudinal) se puede desacoplar de las otras dos (movimiento transversal y guiñada), suponiendo que la velocidad del barco u y el empuje se mantienen constante.

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

$$Y = m(\dot{v} - u_0 r) \quad (19)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (20)$$

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

$$\dot{\psi} = \frac{s\theta_0}{c\theta_0}q + \frac{c\phi_0}{c\theta_0}r \approx r \quad (21)$$

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

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_v v + Y_{\delta}\delta_T \quad (22)$$

$$N = N_{\dot{r}}\dot{r} + N_r r + N_{\delta}\delta_T \quad (23)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} & \frac{mu_0}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_3}{I_z - N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (24)$$

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

El modelo de *Nomoto* de segundo orden es una alternativa muy utilizada por los diseñadores de los sistemas de control para obtener modelos de orden reducido basados en el subsistema lateral (Moreno, 2015; Fossen, 2011). A partir de este modelo es posible obtener la función de transferencia entre el ángulo de guiñada y el ángulo de deflexión del timón horizontal como:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{b_3}{(I_z - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s} = \frac{0,0437}{s(0,1945s + 1)} \quad (25)$$

4. Controlador de rumbo

El controlador de rumbo, tiene el objetivo de seguir las referencias que le son suministrada por el algoritmo de guiado (Valeriano-Medina, 2015). El controlador de rumbo que se ha seleccionado en este trabajo es del tipo P-D, debido a que la acción derivativa provee un margen de fase adicional y por lo tanto aumenta la robustez del mismo (Jalving, 1995)

La ecuación 25 describe de manera simplificada la dinámica lateral del *Krick Felix*. A partir de esta función de transferencia se ajusta un controlador P-D, cuya señal de mando se presenta en la ecuación 26.

$$\delta_T = K_p(\psi_d - \psi) - K_d \dot{\psi} \quad (26)$$

donde K_p y K_d representan los valores de ganancia proporcional y derivativa respectivamente. El valor de ψ_d es usado para denotar el ángulo de dirección deseado, el cual proviene del algoritmo de guiado en función de la ruta que se desea seguir. El ajuste se realiza utilizando la técnica de ubicación de polos y ceros (Valeriano, 2017a). Los valores obtenidos de ganancia son $K_p = 10$ y $K_d = 1$.

5. Controlador $I-LOS$

Para el caso de seguimiento de caminos, donde interesan solo las restricciones espaciales, el objetivo de la ley de guiado se centra en la convergencia del vehículo al camino recto. Por lo que surgen entonces errores de seguimiento asociados a la convergencia del vehículo al camino como se muestra en la Figura 4, dígase el error de seguimiento a lo largo del camino ($x_e(t)$) y el error de seguimiento perpendicular al camino ($y_e(t)$), cuyas expresiones se muestran a continuación:

$$x_e(t) = (x_t - x_k)\cos\alpha_k + (y_t - y_k)\sen\alpha_k \quad (27)$$

$$y_e(t) = -(x_t - x_k)\sen\alpha_k + (y_t - y_k)\cos\alpha_k \quad (28)$$

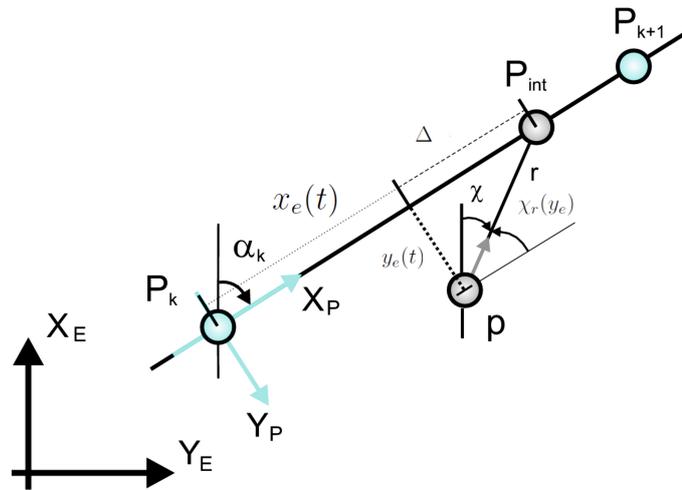


Figura 4. Principales variables del algoritmo de guiado basado en la distancia *lookahead*.

Para contrarrestar la desviación provocada por las corrientes marinas durante el seguimiento de caminos en línea recta, es necesario definir el siguiente objetivo de control:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = 0 \quad (29)$$

De esta manera se consigue precisión en el cálculo del ángulo de rumbo deseado, permitiendo al vehículo vencer los puntos del camino. Para lograr este objetivo se propone utilizar un controlador con acción

integral, tomando tomando los ángulos de deslizamiento lateral como una perturbación pequeña de poca variación, es decir $\beta_r \approx 0$ y $\beta_{rw} \approx 0$.

Para llevar a cabo estas variantes es necesario definir:

$$\Psi_d(y_e) = \chi(y_e) + \beta_r + \beta_{rw} \quad (30)$$

Al adoptar la consideración mencionada anteriormente, la ecuación 30 se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\Psi_d(y_e) = \chi(y_e) \quad (31)$$

El valor de rumbo deseado debe coincidir con el ángulo de curso $\chi(y_e)$, el cual se calcula apartir de la siguiente ecuación.

$$\chi(y_e) = \chi_r(y_e) + \chi_p \quad (32)$$

donde:

$$\chi_p = \alpha_k \quad (33)$$

donde:

$$\chi_r(y_e) = -\arctan(k_p y_e(t) + k_i y_{int}) \quad (34)$$

siendo χ_p el ángulo tangente al camino y $\chi_r(y_e)$ un ángulo de corrección, el cual asegura que la velocidad del vehículo esté en dirección al punto del camino hacia el cual la embarcación se dirige. Por su parte $k_i = k_y k_p$, siendo $k_y > 0$ un parámetro de diseño y \dot{y}_{int} queda definida como:

$$\dot{y}_{int} = \frac{y\Delta}{(\Delta)^2 + (y + k_y y_{int})^2} \quad (35)$$

y donde:

$$k_p = \frac{1}{\Delta} \quad (36)$$

El parámetro Δ está asociado a la distancia *lookahead* que es la distancia que existe entre la proyección de la posición del vehículo sobre el camino y el punto del camino al cual se dirige la embarcación. Este parámetro puede ser variable o constante y su selección está asociado a la longitud del vehículo (de dos a seis veces la longitud del vehículo). Para el caso de esta investigación este valor se toma constante.

Para considerar que un punto del camino ha sido vencido se propone una vía para hacerlo, la cual está asociada a un círculo de aceptación que se establece con cada punto del camino, cuyo radio sería de valor $R_{k+1} > 0$ para el punto del camino $k+1$. De manera tal que el criterio para que el vehículo cambie de dirección hacia el siguiente punto queda definido por:

$$(x_{k+1} - x(t))^2 + (y_{k+1} - y(t))^2 \leq R_{k+1}^2 \quad (37)$$

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

6. Resultados de Simulaciones

Para validar el método propuesto es necesario primeramente definir el camino que se desea que el vehículo recorra. Este camino está compuesto por dos puntos con las coordenadas (x,y) como se muestra en el Cuadro 3 . Es válido aclarar que el vehículo parte desde la posición $[x_0, y_0]^T = [20, 5]^T$.

Cuadro 3

Puntos del camino.

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

Las simulaciones se realizan a 0,01 s de período de muestreo, considerando que el motor gira a 600 rpm, y fijando los valores de las perturbaciones marinas en: $V_c = 0,1 \text{ m/s}$, $\beta_c = 10^\circ$, $V_w = 0,2 \text{ m/s}$ y $\beta_w = 10^\circ$.

Con la información planteada anteriormente, se pretende analizar la conveniencia de seleccionar un valor específico de Δ a partir del comportamiento del error de seguimiento perpendicular al camino. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de este error para valores de $\Delta = 1 \text{ m}$, 2 m y 3 m . Finalmente se selecciona $\Delta = 2 \text{ m}$, pues este valor se encuentra entre el rango de 2 a 6 veces la longitud del vehículo y permite que el error perpendicular al camino se estabilice en cero de forma rápida y sin presentar oscilaciones.

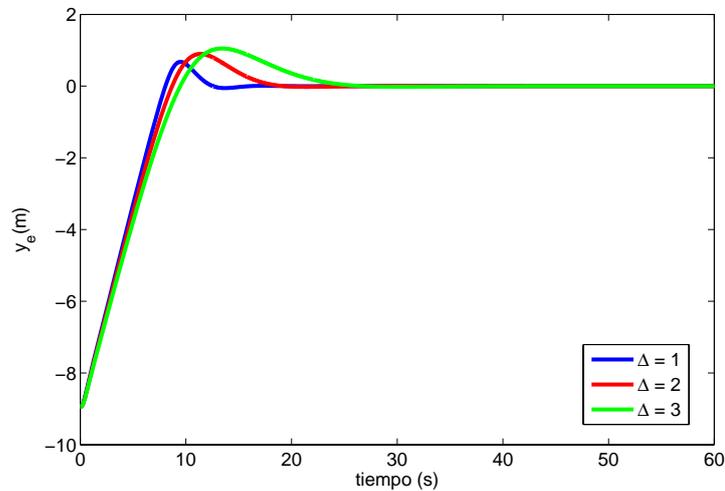


Figura 5. Error de seguimiento perpendicular al camino.

En la Figura 6 se muestra el resultado obtenido durante el seguimiento del camino propuesto para los valores encontrados durante el ajuste del controlador *I-LOS*. Se puede apreciar que la trayectoria de color azul, correspondiente al valor de $\Delta = 2 \text{ m}$, permite la convergencia del vehículo al camino. Por lo que queda demostrado que el efecto integral de la estrategia de control *I-LOS* logra reducir las afectaciones que provocan las corrientes marinas y el viento durante la navegación del vehículo.

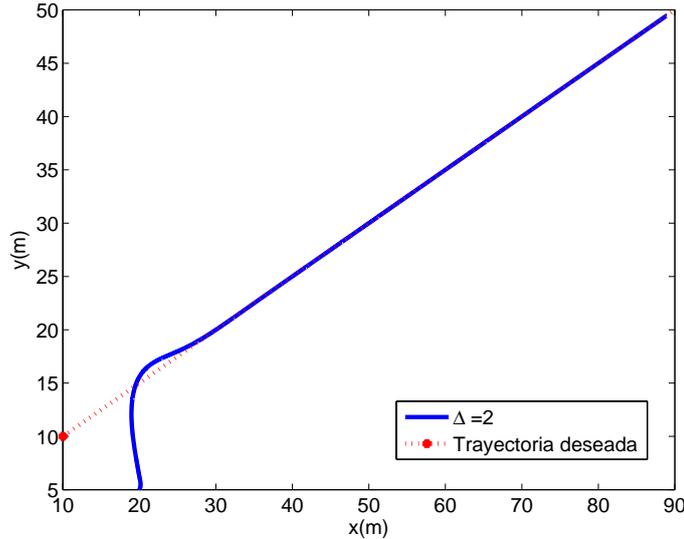


Figura 6. Seguimiento de camino para Δ igual a 2 m.

Para evaluar el desempeño del esquema de guiado propuesto se realiza una serie de pruebas de simulación con el vehículo, donde se modifica el grado de afectación de las perturbaciones sobre la embarcación. Para ello se realizan dos simulaciones que implica el seguimiento del camino definido en el Cuadro 3, sin alterar el ajuste del controlador *I-LOS*. La primera simulación se realiza manteniendo la velocidad de las corrientes constante con valor de $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ y la velocidad del viento variable con valores de $V_w = 0,2 \text{ m/s}$, 1 m/s y 2 m/s . En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos para cada valor de velocidad del viento. Se aprecia como para los valores más elevados de la velocidad del viento, el error perpendicular al camino alcanza un mayor valor, pero la acción integral en todos los casos logra que se estabilice en cero.

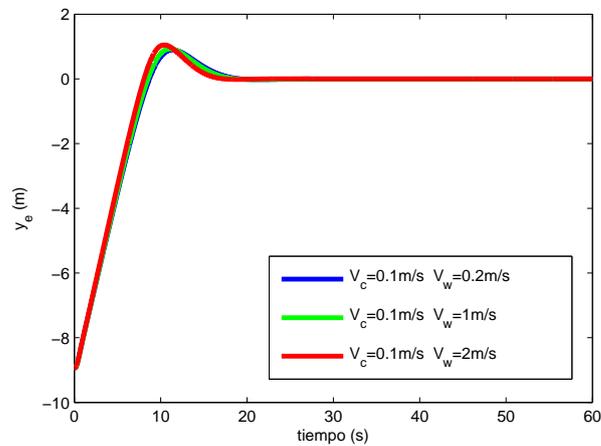


Figura 7. Error de seguimiento perpendicular al camino para diferentes valores de velocidad del viento.

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

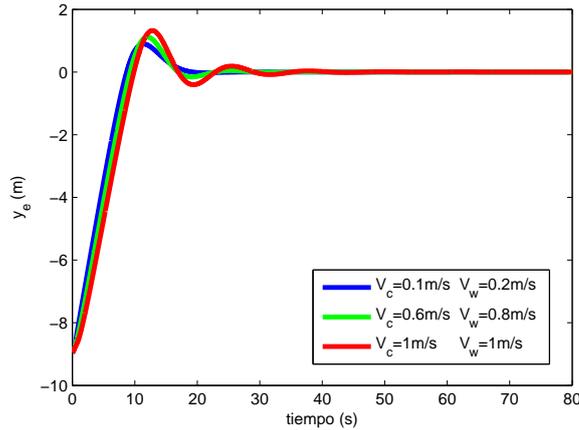


Figura 8. Error de seguimiento perpendicular al camino para diferentes valores de velocidad de las corrientes marinas y el viento.

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

7. Conclusiones

El esquema de guiado $I - LOS$ asegura la convergencia del vehículo al camino. Con la inclusión de una acción integral dentro de la ley de guiado se asegura una disminución del error de seguimiento perpendicular al camino provocado por el efecto que provocan las corrientes marinas y el viento sobre el vehículo. La estructura matemática definida en el controlador $I - LOS$ es de fácil implementación y tiene en cuenta el efecto windup que se produce debido a la acción integral. El cálculo de las ganancias del controlador depende en lo fundamental de la selección del valor de la distancia *lookahead*, la cual se considera constante y dependiente de la longitud del vehículo. Los resultados de las simulaciones realizadas demuestran la viabilidad de utilizar este tipo de esquema en el barco robótico *Krick Felix*.

8. Referencias bibliográficas

Referencias

- Breivik, M.; Fossen, T. I., 2008. Underwater vehicles. InTech, Vienna, Austria, Ch. Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles, pp. 51–76.
- Caharija, W., 2014. *Integral Line-of-Sight Guidance and Control of Underactuated Marine Vehicles*. Tesis doctoral, NTNU, Noruega.
- Chavez, J.; Picado, A. S. J. M., 2005. Aplicaciones de control en barcos. Monografía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

- Fossen, T. I.; Ross, A., 2006. Advances in unmanned marine vehicles. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD, Gran Bretaña, Ch. Nonlinear modelling, identification and control of UUVs, pp. 13–42.
- Fossen, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons., Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I., 2002. Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, Noruega.
- Fossen, T. I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, Nueva York, Estados Unidos.
- Hernández-Julián, A. ; Valeriano-Medina, Y. . F. J. . H. L., 2016. Controlador *I-LOS* considerando la distancia *lookahead* constante para el seguimiento de caminos curvos en *AUV*. In: 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. CUJAE, Habana, Cuba.
- Jalving, B.; Storkensen, N., 1995. The control system of an autonomous underwater vehicle. Modeling, Identification and Control 15 (2), 107–117.
- Lekkas, A. M., Abril 2014. Guidance and path-planning systems for autonomous. Tesis doctoral, NTNU, Noruega.
- Moreno, D.; Besada, E. L.-J. A. C. D. A. J. 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.
- SNAME, April 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.
- Sutulo, S. ; Moreira, L. . G. C., 2002. Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. Ocean Engineering 29 (1), 1–19.
- Valeriano, Y.; García, D. B. C., 2017a. Modelado dinámico del barco de pequeño porte *Krick Felix*. Convención Internacional 2017 Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas . XVII Simposio de Ingeniería Eléctrica.
- Valeriano, Y., Diciembre 2017b. Esquema de guiado y control para el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales de un vehículo subacuático sub-actuado. Tesis doctoral, UCLV, Cuba.
- Valeriano-Medina, Y. ; Hernández, A. . H. L., 2015. Controlador *ilos* para el seguimiento de caminos en línea recta de un vehículo autónomo subacuático. Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones 36 (2), 15 – 28.