

Control Predictivo Aplicado a un Buque Marino

Gonzales Oscar¹; Scaglia Gustavo²

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

²Universidad Nacional de San Juan, Instituto de Ingeniería Química, San Juan, Argentina

Resumen: En el presente artículo se muestra el análisis, diseño e implementación en software de un Controlador Predictivo Basado en Modelo (MPC), en un buque marino. La meta principal de este trabajo residió en hacer que el sistema a controlar, cumpla con el seguimiento de trayectorias predefinidas. Pese a que el buque marino presenta una dinámica no lineal, se adaptó la ley de control a estas características a través de un procedimiento de linealización por series de Taylor. Se contempló como objetivos de control, el error de seguimiento y el incremento de la acción de control, los cuales tuvieron incidencia directa en la minimización del índice de rendimiento del proceso. Además, las restricciones de las acciones de control también se establecieron en el MPC, logrando resultados satisfactorios en el seguimiento de trayectorias de distinta naturaleza. Los resultados se obtuvieron a partir de simulaciones realizadas en un programa computacional, donde se desarrollan los archivos del modelo de la planta y el controlador.

Palabras clave: Control predictivo, MPC, linealización, Taylor, buque marino.

Model Predictive Control Applied to a Marine Vessel

Abstract: In this article is developed the analysis, design and software implementation of a Model Predictive Control (MPC) in a marine vessel. The main goal of this work was to control the system around predefined paths. Although the marine vessel has a non-linear dynamic, the control law was adapted to these features through a procedure of Taylor series linearization. The controller's objectives were the tracking path error and the incremental control law, which had direct impact in the minimization of the performance index of the process. In addition, constraints on control actions were established in the MPC, achieving satisfactory results in the trajectory tracking on paths of different nature. The results were obtained from simulations in a computer program, where scripts contain the plant model and the controller.

Keywords: Predictive control, MPC, linearization, Taylor, marine vessel.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de trayectorias para sistemas autónomos es un problema que día a día trae nuevas contribuciones científicas, debido a las diferentes propuestas que varios científicos estudian, analizan e implementan. En el caso del buque marino, se consideran varios aportes importantes como el estudio sobre seguimiento de trayectorias bajo la influencia de corrientes marinas (Moe, 2013), la implementación de un controlador en un modelo matemático simplificado del buque marino (Lefeber et al, 2003) o el control mediante el enfoque de álgebra lineal (Serrano et al, 2014). Por lo tanto, los antecedentes acerca de sistemas marinos no tripulados tienen un soporte importante, pero aún hay estudios que se siguen realizando con alternativas variadas en técnicas de control.

El Control Predictivo basado en Modelo (MPC), a lo largo de los años se ha convertido en una alternativa muy atractiva especialmente en el sector industrial (Strand y Sagli, 2003).

Los beneficios que se obtienen con el MPC son varios, como planteamiento de restricciones, optimización de la ley de control o predicción de la dinámica de un proceso (Rossiter, 2013). Lo enunciado anteriormente contrasta con el hecho de que el MPC necesita obtener un modelo matemático del sistema cercano al modelo real para ejecutar sin mucho error sus predicciones y las acciones a tomar por parte de la señal de control. Además, no se debe dejar de lado la carga matemática que debe ejecutar el procesador al aplicar el MPC. En la mayoría de los casos la carga es alta, debido a que los componentes de horizonte de predicción y control pueden tomar valores altos para tratar de sintonizar de mejor forma el controlador, generando factores matriciales de alto orden.

Las consecuencias se verán reflejadas en la necesidad de tener un procesador con un ciclo de trabajo del orden de los micro o nano segundos con una memoria lo suficientemente capaz de realizar estas operaciones sin generar un retardo al lazo cerrado del sistema (Camacho y Alba, 2013). No obstante, la

oscar.gonzalesz@epn.edu.ec

Recibido: 22/06/2015

Aceptado: 18/10/2016

Publicado: 20/01/2017

aplicación de Controladores Predictivos No Lineales Basados en Modelo (NMPC), es una alternativa válida que se ve menos afectada por el costo computacional (Kouvaritakis y Cannon, 2011).

La ejecución del MPC radica en un algoritmo que toma el valor de la o las variables de salida del proceso para realizar predicciones sobre las mismas y de esta manera, adelantarse a estas predicciones mediante la acción de control. También es importante acotar que el MPC puede trabajar tanto con sistemas monovariantes o multivariantes, lo cual convierte a esta técnica en un algoritmo muy versátil y competitivo en relación con otras técnicas de control. Se puede predecir uno o varios cambios de las variables de estado mediante un parámetro llamado horizonte de predicción. Las variables de control necesarias para llevar a uno o más estados a valores deseados, se pueden regular con el parámetro conocido como horizonte de control.

El análisis minucioso del control predictivo ha originado el planteamiento de algunas variantes en su diseño e implementación, y lo más importante, se ha extendido hacia sistemas robóticos los cuales poseen estados transitorios más rápidos que los que experimentan los procesos industriales.

Los trabajos de De Olivera y Lages (2006), Gonzales et al (2014) y Rosales (2009) entre otros, precisan alternativas variadas en la implementación del MPC, obteniendo resultados que avalan la aplicación de un controlador de costo computacional alto como lo es el control predictivo. El controlador a implementar en este artículo toma como punto de partida a un sistema en variables de estado. Por la no linealidad del buque marino, se recurre a un proceso de linealización por series de Taylor y se plantea la función de costo (o índice de rendimiento) para obtener una ley de control óptima, sin dejar pasar por alto, las restricciones que tiene el sistema en las variables de control.

El presente artículo se plantea de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el modelo matemático del buque marino, en la sección 3, se linealiza el sistema, en la sección 4, se formula y diseña el MPC, en la sección 5 se muestran los resultados obtenidos por simulación y finalmente, en la sección 6, se ofrecen las conclusiones obtenidas del tema planteado.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL BUQUE MARINO

El buque marino es un sistema relativamente complejo, debido a que cuenta con varias variables internas que se obtienen de los ejes de referencia del sistema, uno de coordenadas globales y otro de coordenadas referidas a la estructura del buque tal como se muestra a continuación en la Figura 1 y Tabla 1 (Lefeber et al, 2003):

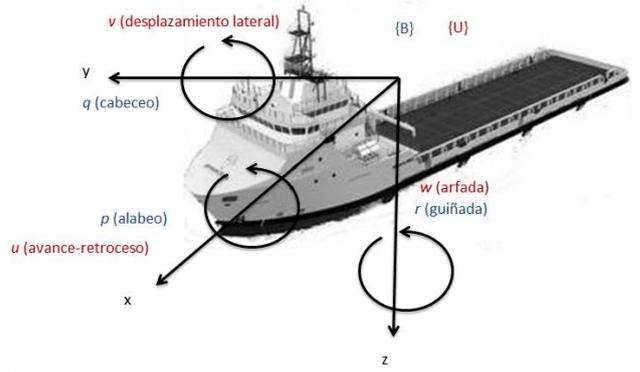


Figura 1. Buque marino representado en coordenadas globales U y en movimiento B.

Tabla 1. Variables del buque marino.

Coordenadas	Posición	Velocidad	Torque
Globales	x, y, z	u, v, w	T_u, T_v, T_w
En Movimiento	ϕ, θ, ψ	p, q, r	T_p, T_q, T_r

Sin embargo, se puede obtener un modelo equivalente descartando ciertas variables de estado, como por ejemplo el movimiento en el eje z el cual físicamente no es posible. De esta forma el modelo matemático del barco es el siguiente, Ecuación (1) (Serrano et al, 2014):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} &= r \\ Bf &= M\dot{v} + C(v)v + Dv \end{aligned} \tag{1}$$

Los valores de las matrices del modelo del buque marino, Ecuación (2), son tomados de (Serrano et al, 2014).

$$M \triangleq \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$D \triangleq \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$B \triangleq \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix}$$

$$C(v) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v + m_{23}r & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Desarrollando las expresiones dinámicas, se tienen las siguientes Ecuaciones (3), (4) Y (5):

$$\dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{23}}{m_{11}}r^2 - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{b_{11}}{m_{11}}T_u \quad (3)$$

$$\dot{v} = -\left(\frac{m_{23}}{m_{11}}\dot{r} - \frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_2}v - \frac{d_{23}}{m_{22}}r\right) \quad (4)$$

$$\dot{r} = -\frac{m_{23}}{m_{33}}\dot{v} + \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv - \frac{m_{23}}{m_{33}}ur - \frac{d_{32}}{m_{33}}v - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{b_{32}}{m_{33}}T_r \quad (5)$$

Para la implementación del controlador predictivo, se partirá de la expresión del sistema en espacio de estados, por lo que se realiza operaciones algebraicas para que cada derivada de una variable de estado, no quede en función de otra derivada. Es por eso, que se realiza el reemplazo de la Ecuación 4 en la Ecuación 5.

Finalmente, las ecuaciones dinámicas que se linealizarán para plantear al sistema en espacio de estados, son Ecuación (6), (7) y (8):

$$\dot{x} = u\cos(\psi) - v\sin(\psi)$$

$$\dot{y} = u\sin(\psi) + v\cos(\psi)$$

$$\dot{\psi} = r$$

$$\dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{23}}{m_{11}}r^2 - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{b_{11}}{m_{11}}T_u \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} = & -\left(\frac{m_{23}}{m_{11}}\left(\frac{m_{22}}{m_{22}m_{33} - m_{22}^2}\left((m_{11} - m_{22})uv\right.\right.\right. \\ & + \left.\left.\left(\frac{m_{11} - m_{23}}{m_{22}} - m_{23}\right)ur\right.\right. \\ & + \left.\left.\left(\frac{d_{22} - m_{23}}{m_{22}} - d_{23}\right)v\right.\right. \\ & + \left.\left.\left(\frac{d_{23} - m_{23}}{m_{22}} - d_{33}\right)r + b_{32}T_r\right)\right) \\ & - \frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_2}v - \frac{d_{23}}{m_{22}}r \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} = & \frac{m_{22}}{m_{22}m_{33} - m_{22}^2}\left((m_{11} - m_{22})uv\right. \\ & + \left.\left(\frac{m_{11} - m_{23}}{m_{22}} - m_{23}\right)ur\right. \\ & + \left.\left(\frac{d_{22} - m_{23}}{m_{22}} - d_{23}\right)v\right. \\ & + \left.\left(\frac{d_{23} - m_{23}}{m_{22}} - d_{33}\right)r + b_{32}T_r\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Los valores de los elementos de las matrices del modelo dinámico, son tomados de Børhaug et al. (2011), y se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores de los parámetros del buque marino.

Parámetro	Valor
m_{11}	25.8
m_{22}	33.8
m_{23}	-11.748
m_{32}	-77.748
m_{33}	6.813
d_{11}	2
d_{22}	7
d_{23}	-2.5425
d_{32}	-2.5425
d_{33}	1.422
b_{11}	1
b_{33}	1

3. LINEALIZACIÓN

Para linealizar al modelo del buque marino, se tienen varias alternativas, pero la que se usará es la expansión de una función en su equivalente de series de Taylor, las cuales estarán evaluadas en el punto de operación (De Olivera y Lages, 2006).

Por lo tanto, la función no lineal se expresa como:

$$\dot{\chi} = f(\chi, \mu)$$

Donde su equivalente en series de Taylor es la Ecuación (9):

$$\begin{aligned} \dot{\chi} = & f(\chi_r, \mu_r) + \frac{\partial f(\chi, \mu)}{\partial \chi} \Big|_{\substack{\chi=\chi_r \\ \mu=\mu_r}} (\chi - \chi_r) \\ & + \frac{\partial f(\chi, \mu)}{\partial \mu} \Big|_{\substack{\chi=\chi_r \\ \mu=\mu_r}} (\mu - \mu_r) \end{aligned} \quad (9)$$

Se descartan los términos iguales y superiores al de segundo orden, obteniendo la función linealizada en los puntos χ_r, μ_r . Al hacer esta aproximación, se obtiene un error el cual es mínimo ya que los componentes de segundo orden hacia adelante tienen matemáticamente poca incidencia en el sistema.

De esta forma las matrices de estado usadas para representar al modelo linealizado, se obtienen de:

$$A = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_r \\ u=u_r}}$$

$$B = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \Big|_{\substack{x=x_r \\ u=u_r}}$$

Es importante tener en cuenta que las trayectorias que siga el buque marino presentan diferentes puntos de operación, por lo cual, la linealización se realizará en cada coordenada de las ecuaciones de las trayectorias cada cierto tiempo de muestreo.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

4.1 Discretización del Modelo

El modelo se discretiza mediante el algoritmo de Euler, por tal razón, el sistema queda expresado de la siguiente forma, Ecuación (10):

$$\tilde{x}(k+1) = \bar{A}\tilde{x}(k) + \bar{B}\tilde{u}(k) \quad (10)$$

Hay que tomar en cuenta, que el sistema posee las desviaciones de las variables de estado y de las variables de control (debido a la linealización), es por eso que:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_r - x \\ \tilde{u} &= u_r - u \end{aligned}$$

El tiempo de muestreo se escogerá de acuerdo a las pruebas realizadas con el controlador.

4.2 Formulación del Controlador

Una vez discretizado el modelo, se formula el MPC en espacio de estados de acuerdo a lo revisado en (Wang, 2009), Ecuación (11).

$$x_m(k+1) = Ax_m(k) + B\Delta u(k) \quad (11)$$

Las variables de estado a utilizar son:

$$x_m(k) = [\Delta\tilde{x}(k)^T \quad \tilde{y}(k)]^T$$

En donde se observa que se necesitan los incrementos de la desviación de las variables de estado y las desviaciones de las salidas a controlar. En esta ocasión, se controlan todas las salidas para mejorar el desempeño del controlador.

De esta última expresión, se pueden predecir los cambios de las variables de estado a través del horizonte de predicción N_p , y las acciones que se deberían tomar en base a esos cambios, con el horizonte de control N_c .

4.3 Función de Costo

La Ecuación (12) presenta la ecuación a minimizar:

$$J = (R_s - \tilde{Y})^T Q (R_s - \tilde{Y}) + \Delta U^T R \Delta U \quad (12)$$

Se toman en cuenta los errores de las variables a controlar y el incremento del esfuerzo de control. Además, se pueden ponderar los términos mencionados anteriormente mediante las matrices Q y R . Para los errores, se toman ponderaciones distintas, mientras que las variables de control llevan igual ponderación debido al resultado obtenido de las pruebas realizadas.

4.4 Restricciones

Las restricciones se implementan en las variables de control, de acuerdo a la siguiente Ecuación (13):

$$\Delta u^{min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u^{max} \quad (13)$$

Los torques de control se mantendrán en los siguientes rangos, mediante la implementación de restricciones en el controlador dadas en Serrano et al, 2014:

$$\begin{aligned} -8 Nm &\leq T_u(k) \leq 8 Nm \\ -8 Nm &\leq T_r(k) \leq 8 Nm \end{aligned}$$

5. RESULTADOS

Las simulaciones se obtienen en Matlab, con un tiempo de muestreo de $T = 0.01$ s que se ha determinado como el periodo de tiempo que ofrece una mejor respuesta por parte del MPC, previa ciertas pruebas en el software. Otros valores utilizados como tiempo de muestreo fueron: $T = 0.1$ s y $T = 0.5$ s, teniendo mejores resultados con el tiempo de $T = 0.01$ s debido a que el buque marino posee una dinámica rápida y el controlador predictivo necesita procesar más rápidamente el algoritmo. Las trayectorias que se proponen son de distinta naturaleza como lo son: cuadrada, circular y en forma de ocho; estas varían entre sí especialmente por la curvatura que ofrecen en el camino que debe seguir la planta. El objetivo de probar al controlador en las diferentes trayectorias ya determinadas es ensayar principalmente el seguimiento de orientación que debe seguir el buque.

Además, se indica que el modelo del buque marino utilizado en las pruebas es no lineal, solo el controlador toma el modelo del buque no lineal y lo linealiza en cada instante de simulación para calcular la ley de control.

5.1 Simulación en una trayectoria cuadrada

En esta trayectoria, los valores usados como referencias del plano fueron los de un cuadrado de lado $L = 32$ m, como se aprecia en la Figura 2, la orientación se plantea paralela a cada lado del cuadrado. En cuanto a las velocidades, los valores son: $u = 1$ m/s, y $r = \dot{\psi}$. En lo que respecta a v , la linealización se realiza tomando en cuenta el valor actual que presenta el modelo en cada instante de simulación. La razón por la cual no se toma un valor específico para la velocidad v , tiene que ver con el objetivo del MPC que es seguir la trayectoria descrita en x y y , por lo tanto el valor de v es una consecuencia dada por los objetivos de posición espacial a seguir. Además, el valor constante elegido para la velocidad u tiene su razón de ser en el hecho de que el movimiento en la trayectoria es lineal en la mayoría de su recorrido. El valor dispuesto ha sido implementado a través de pruebas en las cuales se ha observado que el valor de 1 m/s hace que el buque siga la trayectoria, especialmente en las curvas donde su orientación cambia.

Como se mencionó en un apartado anterior, las ponderaciones para cada variable del sistema son diferentes, estas ponderaciones están ligadas a cada variable como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} Q_1 &\rightarrow x \\ Q_2 &\rightarrow y \\ Q_3 &\rightarrow \psi \\ Q_4 &\rightarrow u \end{aligned}$$

$$Q_5 \rightarrow v$$

$$Q_6 \rightarrow r$$

Por lo tanto, los valores de controlador son:

- Horizonte de predicción (N_p) = 12
- Horizonte de control (N_c) = 1
- Ponderación en R = 0.0001
- Ponderación en Q_1 = 30
- Ponderación en Q_2 = 30
- Ponderación en Q_3 = 50
- Ponderación en Q_4 = 10
- Ponderación en Q_5 = 20
- Ponderación en Q_6 = 1

Con lo cual, se obtiene el seguimiento del buque marino para esta trayectoria, como se observa en la Figura 2:

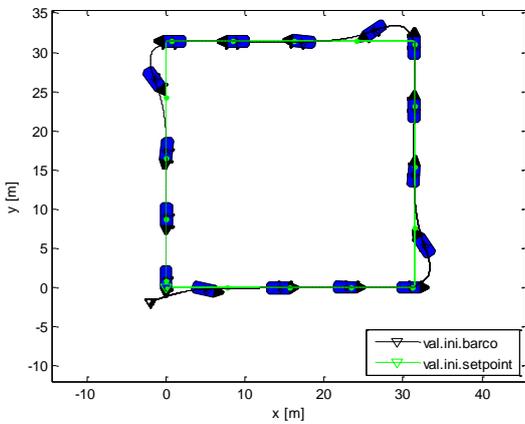


Figura 2. Trayectoria cuadrada.

La trayectoria cuadrada es uniforme en casi todos sus puntos, a excepción de las esquinas en donde el cambio de orientación es brusco debido al cambio que debe aplicar el buque tanto en posición como en orientación.

Los errores de seguimiento, se observan en la Figura 3:

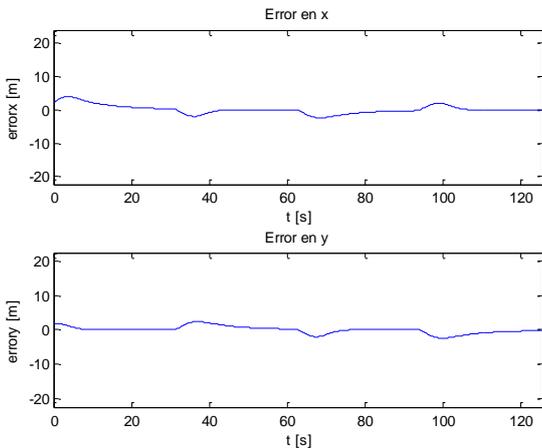


Figura 3. Errores de seguimiento en la trayectoria cuadrada.

Se observa que el error de posición crece las esquinas del cuadrado, y las acciones de control necesarias para compensarlo, son altas. Sin embargo, el sistema consigue recuperar el rumbo y seguir viajando en la parte recta del

cuadrado mostrando un buen seguimiento y es coherente con la información proporcionada en la gráfica anterior.

Las señales de control respectivas, se muestran en la Figura 4:

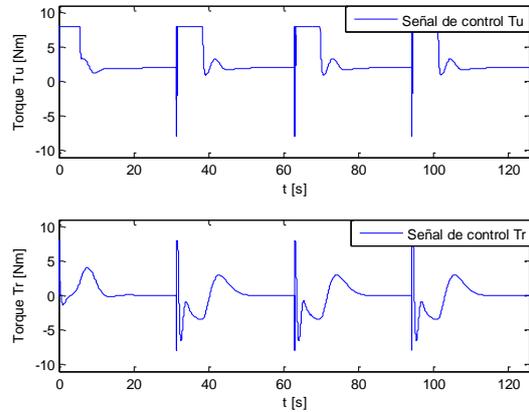


Figura 4. Señales de control en la trayectoria cuadrada.

En la sintonización del controlador la variable que posee más ponderación es la orientación, seguida de las posiciones x e y . Esto se debe a que los cambios en la trayectoria no son tan intensos a excepción de las esquinas en donde el buque debe ser capaz de cambiar su orientación drásticamente. El peso dado a la señal de control es bajo debido a que la trayectoria cuadrada lo permite por los segmentos lineales que presenta. El valor del horizonte de predicción fue el primero en ser probado hasta lograr que el buque tome la trayectoria, el horizonte de control afinó el desempeño de la señal de control con lo cual se llegaron a los valores de 12 y 1 respectivamente. Como se explicó en un párrafo anterior, no hay un procedimiento estandarizado para sintonizar un controlador predictivo, por lo cual, los valores mostrados de los parámetros del MPC de esta trayectoria pueden cambiar si se toma otro enfoque como el de forzar un poco más la señal de control.

5.2 Simulación en una trayectoria circular

La segunda trayectoria de prueba es un círculo representado paramétricamente por las siguientes expresiones, Ecuación (15):

$$x = 10 \cos(\omega t) \text{ m}$$

$$y = 10 \sin(\omega t) \text{ m} \quad (14)$$

En cuanto a la orientación, se plantea la siguiente expresión, Ecuación (15):

$$\psi = \frac{\pi}{2} + (\omega t) \text{ rad} \quad (15)$$

De esta forma, lo que se consigue es fijar la orientación del buque marino tangente en todos los puntos de la trayectoria circular a seguir.

Se mantienen los valores de consigna para las velocidades.

Los parámetros del MPC son:

- Horizonte de predicción (N_p) = 4
- Horizonte de control (N_c) = 2

- Ponderación en $R = 0.001$
- Ponderación en $Q_1 = 20$
- Ponderación en $Q_2 = 20$
- Ponderación en $Q_3 = 50$
- Ponderación en $Q_4 = 10$
- Ponderación en $Q_5 = 10$
- Ponderación en $Q_6 = 1$

La respuesta del sistema en esta trayectoria se observa en la Figura 5:

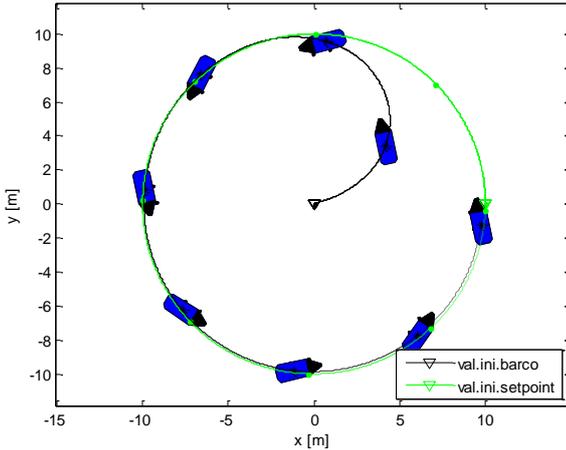


Figura 5. Trayectoria circular.

El buque marino toma como posición inicial el centro del círculo y con el transcurso del tiempo se adapta al contorno de la trayectoria predefinida llegando a alcanzar la misma a los 90°.

Los errores de seguimiento, se observan en la Figura 6:

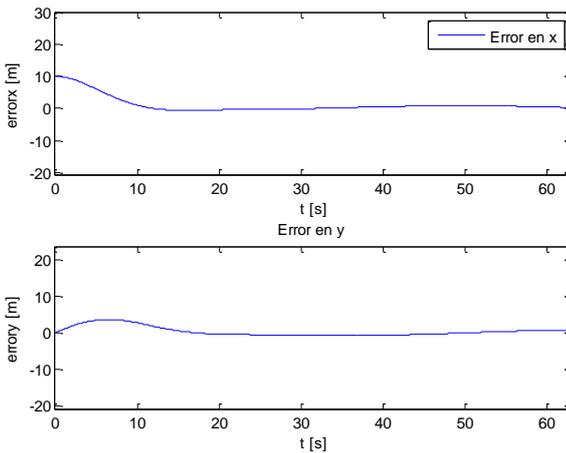


Figura 6. Errores de seguimiento de la trayectoria circular.

En esta trayectoria, se observa en un principio que el error de seguimiento es máximo, los valores de las señales de control necesarios para corregir el error son altos. No obstante, con el transcurso del tiempo, se obtiene un buen seguimiento de la trayectoria con variaciones suaves de las señales de control.

Las señales de control respectivas, se muestran en la Figura 7:

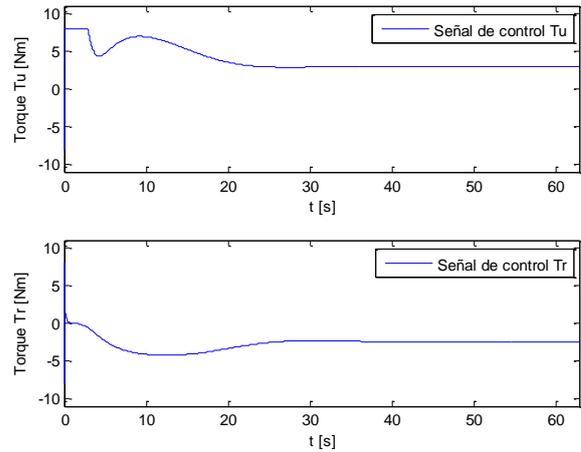


Figura 7. Señales de control en la trayectoria circular.

La señal de control para el torque Tu es alta en un inicio para compensar el error de posición que también es alto, lo cual no sucede con el torque Tr que presenta valores dentro del rango de trabajo determinado por las restricciones (Serrano et al, 2014). No obstante, las restricciones permiten limitar su valor y de esta forma no se superan los límites pre-establecidos en el diseño. Se aumentó la ponderación de la señal de control para que el sistema se acople a una trayectoria curva. Esto también obligó a hacer cambios en los horizontes de predicción y control para evitar que el buque tome una trayectoria errónea, tal cual ocurrió en las pruebas realizadas.

5.3 Simulación en una trayectoria en forma de ocho

La tercera trayectoria también es conocida como lemniscata de Bernoulli. Las ecuaciones que se usan son, se presentan en la Ecuación (16):

$$\begin{aligned} x &= \frac{10\sqrt{2} \cos(wt)}{(\text{sen}^2(wt)+1)} m \\ y &= \frac{10\sqrt{2} \cos(wt) \text{sen}(wt)}{(\text{sen}^2(wt)+1)} m \end{aligned} \quad (16)$$

La orientación, se obtiene a través de la Ecuación (17):

$$\psi = \text{atan2} \left(\frac{y'}{x'} \right) \text{rad} \quad (17)$$

La anterior expresión se obtiene como consecuencia de derivar las posiciones en x e y , la relación entre estas está ligada con la orientación, que como en el caso anterior, se busca que sea siempre tangente en cada punto del camino a seguir por la planta. Se mantienen los valores de los ejemplos anteriores para las velocidades.

Los parámetros del MPC son:

- Horizonte de predicción (Np) = 12
- Horizonte de control (Nc) = 1
- Ponderación en $R = 0.0001$

- Ponderación en $Q_1 = 30$
- Ponderación en $Q_2 = 30$
- Ponderación en $Q_3 = 50$
- Ponderación en $Q_4 = 10$
- Ponderación en $Q_5 = 20$
- Ponderación en $Q_6 = 1$

La respuesta en esta trayectoria, se observa en la Figura 8:

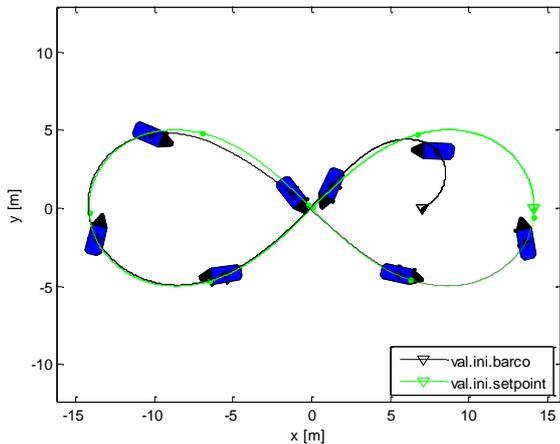


Figura 8. Trayectoria en forma de ocho.

La trayectoria en forma de ocho, tiene zonas en donde su curvatura no es tan pronunciada y otras en las que sí lo es. Donde se presenta una mayor curvatura, la señal de control se alta para corregir el valor del error, cuando es baja, las señales de control varían de forma suave.

Los errores de seguimiento, se observan en la Figura 9:

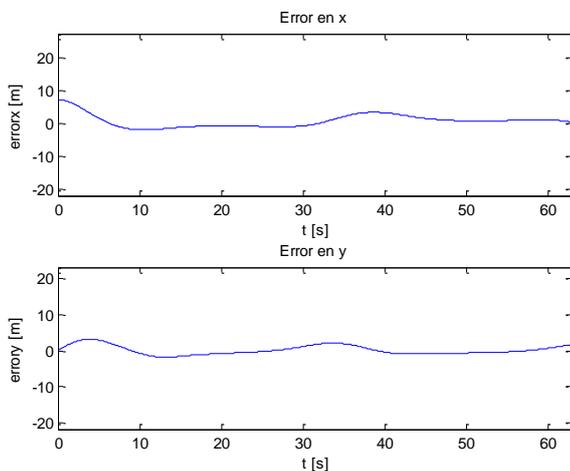


Figura 9. Errores de seguimiento en la trayectoria en forma de ocho.

De acuerdo a la naturaleza de la trayectoria, los errores de posición oscilan entre valores cercanos a cero, lo cual, reafirma la dificultad que tiene el sistema en el seguimiento. Tomando como referencia la Figura 8, se evidencia que los errores varían por la orientación del buque, ya que éste trata de adaptarse a la curva pero el cambio de dirección de la trayectoria es rápido.

Las señales de control respectivas, se muestran en la Figura 10:

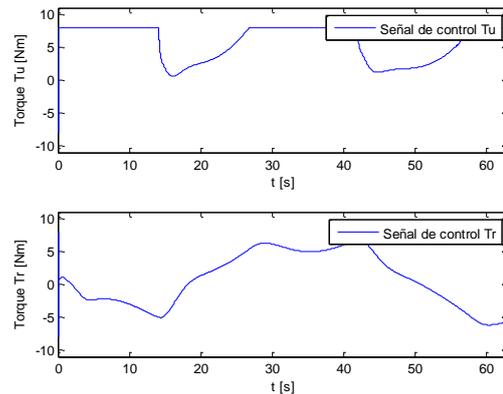


Figura 10. Señales de control en la trayectoria en forma de ocho.

El esfuerzo de control es alto para el torque Tu , pero no sobrepasa los límites de las restricciones. Tal como se observó en la trayectoria circular, el seguimiento de un camino curvo provoca un esfuerzo mayor en la primera variable de control para hacer posible que la orientación se adapte al camino a seguir. Se realizó la prueba con los valores implementados en la trayectoria cuadrada y se logró seguir el camino en forma de ocho debido a que se escogió la trayectoria con una curvatura no tan pronunciada para no exigir demasiado al controlador.

6. CONCLUSIONES

En este artículo, se considera el problema de seguimiento de trayectorias para un buque marino mediante el diseño de un MPC.

El desarrollo del modelo matemático del buque marino tuvo una serie de procedimientos que hicieron que el resultado final varíe considerablemente con la propuesta original. Las aproximaciones del modelo dinámico y el desarrollo en series de Taylor, tomando en cuenta los términos lineales de la misma dieron como resultado un modelo del proceso sencillo que el MPC puede adaptar bien a su ley de control.

Las trayectorias seleccionadas son de distinta complejidad con el objetivo de probar el control en dos ambientes distintos, en uno con una trayectoria uniforme con pocos cambios bruscos y el segundo en una trayectoria con bastantes cambios pero una manera uniforme. Las trayectorias curvas hacen que el esfuerzo de control en el torque Tu del buque marino sean altas por la diferencia que existe entre la orientación de referencia y la del buque, a tal modo de alcanzar el valor máximo predefinido por las restricciones. No obstante, las restricciones implementadas en la ley de control del MPC no permiten la generación de señales de control fuera de rango.

La sintonización del controlador fue heurística, tomando en cuenta criterios como el de esforzar en lo menos posible la señal de control y mantener un error de seguimiento lo más cercano a cero. Además, se tomó en cuenta la variación de los parámetros de horizonte de predicción y control para afinar el resultado final de la ley de control.

El control realizado en todas las variables de estado del sistema hace que el controlador mejore su rendimiento, debido a que se consideran más factores al momento de establecer un objetivo. En cierta forma el controlador tiene un esquema parecido al de un LQR, el cual también posee una función de costo por minimizar y ponderaciones a todas las variables de estado de la planta.

En futuros trabajos, se recomienda analizar más modelos, y tener como estrategia auxiliar, un MPC no lineal.

REFERENCIAS

- Børhaug, E., Pavlov, A., Panteley, E., & Pettersen, K. Y. (2011). Straight line path following for formations of underactuated marine surface vessels. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(3), 493-506. <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2010.2050889>
- Camacho, E. F., & Alba, C. B. (2013). *Model predictive control*. Springer Science & Business Media.
- De Oliveira, V. M., & Lages, W. F. (2006, May). Linear predictive control of a brachiation robot. In *Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE'06. Canadian Conference on* (pp. 1518-1521). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/CCECE.2006.277836>
- Gonzales, O., Rosero, J., & Rosales, A. (2014). Control Predictivo Aplicado a un Robot Móvil. *Revista Politécnica*, 34(1). Obtenido de: base de datos de la Revista Politécnica.
- Kouvaritakis, B., & Cannon, M. (2001). *Non-linear Predictive Control: theory and practice* (No. 61). Iet.
- Lefeber, E., Pettersen, K. Y., & Nijmeijer, H. (2003). Tracking control of an underactuated ship. *IEEE transactions on control systems technology*, 11(1), 52-61. <http://dx.doi.org/10.1109/CDC.1998.762046>
- Moe, S. (2013). Path Following of Underactuated Marine Vessels in the Presence of Ocean Currents. Obtenido de: http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/261024/-1/649659_FULLTEXT01.pdf. (Diciembre, 2015)
- Rosales Acosta, A. (2009). Dynamic nonlinear model based predictive control for mobile robots. *Repositorio Digital de la Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de: base de datos del repositorio digital de la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Rossiter, J. A. (2013). *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press.
- Serrano, M. E., Scaglia, G. J. E., Godoy, S. A., Mut, V., & Ortiz, O. A. (2014). Trajectory tracking of underactuated surface vessels: A linear algebra approach. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 22(3), 1103-1111. <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2013.2271505>
- Strand, S., & Sagli, J. R. (2003, January). MPC in Statoil-Advantages with in-house technology. In *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM)* (pp. 97-103). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.4869&rep=rep1&type=pdf>
- Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media.



Oscar Gonzales: Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Control. Se ha desempeñado como Técnico Docente y Profesor Ocasional 2 en la Escuela Politécnica Nacional desde el 2014. También, se encuentra finalizando sus estudios en la Maestría de Automatización y Control Electrónico Industrial de la Escuela Politécnica Nacional.

Sus áreas de interés son: sistemas de control avanzado, robótica y automatización industrial.



Gustavo Scaglia: Sus estudios superiores los realizó en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, donde obtuvo el título de Ingeniero Electrónico. En la misma institución, obtuvo el título de Maestría en Ingeniería de Sistemas de Control y el título de Doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control. Actualmente, se desempeña como docente investigador en el Instituto de Ingeniería Química de la

Universidad de San Juan. Ha realizado varias publicaciones indexadas y capítulos de libro como: Aplicaciones de Control Robusto en Robótica y Temas de Automática Industrial (Red Interamericana de Informática Industrial). Sus áreas de interés son: control H infinito, control robusto y control predictivo.