

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TRÁILER AUTÓNOMO

WILDER MEDINA MEDINA

<https://orcid.org/0000-0003-2412-7148>

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y de Sistemas, Lima, Perú

Recibido: 8 de junio del 2021 / Aprobado: 1 de julio del 2021

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5799>

RESUMEN. El presente trabajo define un diseño de control que consiste en integrar dos técnicas: una lineal LQR y una red neurodifusa, de tal manera que este sistema híbrido brinde un rango de trabajo amplio para que el tráiler siga cualquier trayectoria en direcciones de avance y retroceso simulando las reales condiciones de una conducción humana. Se propone también el seguimiento de cualquier trayectoria mediante el diseño de un método general para calcular los valores deseados de los estados del sistema, de tal manera que, con solo definir una función matemática de la ruta que se va a seguir, se conozcan los valores para el control del robot tipo tráiler. Se lograron resultados favorables del sistema aplicándolo en un ambiente controlado.

PALABRAS CLAVE: redes neuronales / sistemas difusos / tráileres / control automático / sistemas dinámicos no holonómicos

DESIGN OF A CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS TRAILER

ABSTRACT. The present work defines a control design, which consists of integrating two techniques: linear LQR and a neuro-diffuse network, in such a way that this hybrid system provides a wide working range for the trailer to follow any trajectory in advance and recoil directions simulating the real conditions of human driving. It is also proposed the monitoring of any trajectory designing a general method to calculate the desired values of the system states, in such a way that, by simply defining a mathematical function of the route to follow, the values for the control of the trailer type robot are known. Favourable results of the system were achieved and applied in a controlled environment.

KEYWORDS: neural networks / fuzzy systems / automatic control / trailers / nonholonomic dynamical systems

Correo electrónico: wmedinam@gmail.com

INTRODUCCIÓN: TRÁILER AUTÓNOMO

Uno de los modelos de vehículos móviles que existen para transporte de carga es el tipo tráiler, el cual es usado en diferentes campos de la industria, en especial en el transporte de material de grandes volúmenes o de contenedores. También se emplean con este fin los camiones de un solo cuerpo, a los que se añade un remolque de igual o mayores dimensiones, lo que incrementa notablemente la eficiencia en el transporte terrestre de carga. Sin embargo, los robots tipo tráiler tienen un sistema de funcionamiento muy complejo de controlar, debido a su modelo no lineal, inestable y no holonómico; incluso el control es más difícil aún en el movimiento de retroceso. Esto ha llevado a que exista mucha investigación sobre cómo controlarlo mediante el análisis del movimiento que realiza (Béjar & Morán, 2019).

El presente trabajo de investigación desarrolla el diseño de control de un tráiler de dos cuerpos basado en un control lineal integrado con una red neurodifusa, que permita dirigir el tráiler a la posición deseada o hacer que siga trayectorias lineales, circulares o sinusoidales; y que limite el ángulo formado por ambos cuerpos para evitar que colapsen (Evestedt et al., 2016). Este sistema autónomo puede ser aplicado en espacios controlados, como puertos o terminales de almacenamiento que utilizan estos vehículos para realizar el transporte de mercadería, de manera que automatizan el proceso y a la vez reducen los riesgos que se generan en una conducción manual. Así, la empresa obtiene mayor seguridad, eficacia y eficiencia (Li et al., 2017).

Habiendo analizado múltiples referencias, se halló que muchas investigaciones varían por el modelo del tráiler que utilizan, pues existen varias formas en la estructura, tanto en la unión como en la locomoción (Leng & Minor, 2017), de tal manera que los autores definen diferentes modelos matemáticos y todos funcionan correctamente. También se observó la variedad de diseños de control que se utilizan para tener un buen manejo del robot tipo tráiler tanto en pequeños rangos de trabajo como para rangos mayores, considerando límites en ciertas variables del sistema (Do & Chen, 2013).

Este trabajo de investigación se enfoca en un robot tipo tráiler con una estructura de unión directa cuerpo a cuerpo. Se muestra su modelo matemático sobre la base de un análisis de variación en retroceso en un instante de tiempo (Medina Medina, 2018).

El aporte más significativo de esta investigación es proponer un diseño de control híbrido que combina un controlador lineal LQR con redes neurodifusas, de tal manera que trabaje con base en un modelo linealizado del robot. Gracias a la lógica difusa y las redes neuronales, se amplía el rango de funcionamiento y, lo más importante, se limita el ángulo que se forma entre ambos cuerpos del robot móvil. Asimismo, se busca que también sea capaz de seguir cualquier tipo de trayectoria tanto en avance como en retroceso, con simplemente definir las funciones correspondientes de los valores deseados.

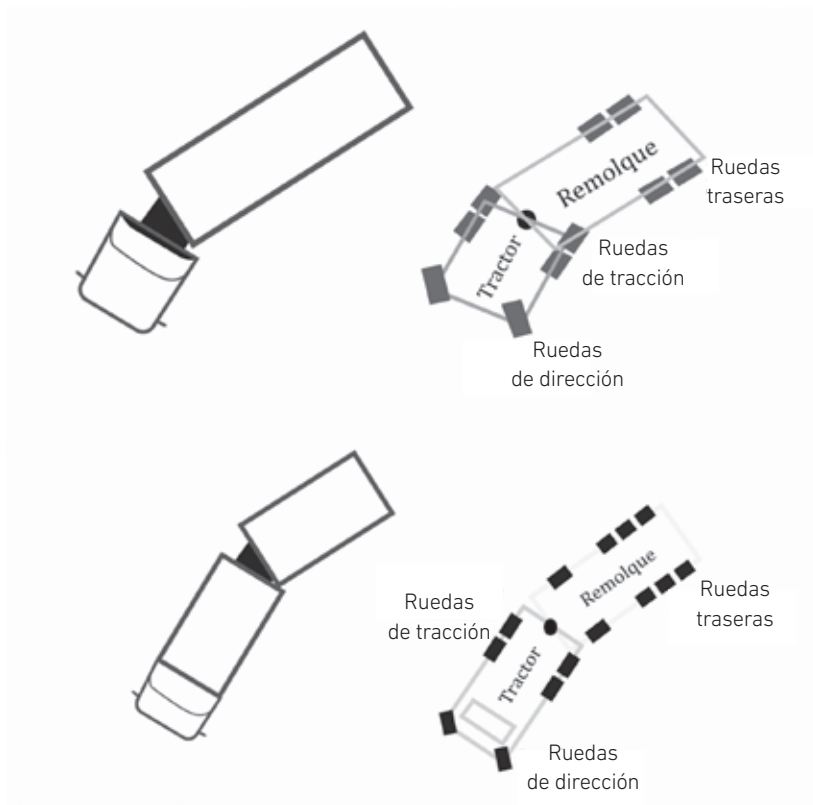
METODOLOGÍA

Diseño del sistema de control autónomo

El modelado del tráiler se realiza a partir de un análisis geométrico, aplicando un procedimiento de movimiento en retroceso en un pequeño intervalo de tiempo, de manera que se generan las condiciones de posición en un instante t y en un instante $t + \Delta t$. En la figura 1 se muestra cómo está compuesto el tráiler en dos versiones: en la parte frontal se encuentran las ruedas de dirección y las ruedas de tracción, mientras que en la parte de la carga tiene únicamente ruedas de giro libre.

Figura 1

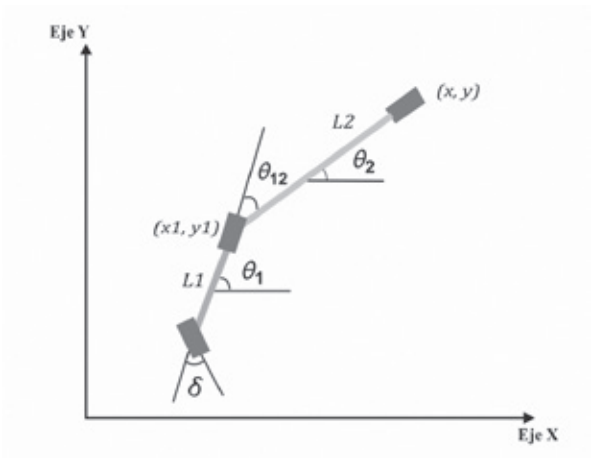
Robot móvil tipo tráiler en dos versiones



Considerando que las ruedas del lado derecho e izquierdo se trasladan de igual manera, se realiza el análisis como si fueran dos barras, sobre la base del análisis del robot móvil tipo bicicleta (véase la figura 2).

Figura 2

Análisis mediante el modelo tipo bicicleta

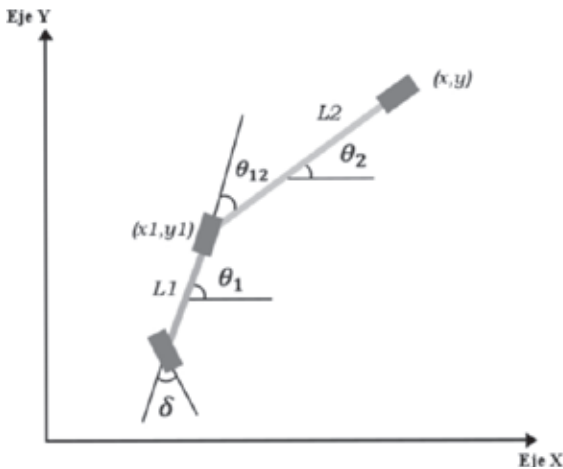


Para obtener las ecuaciones del modelo del sistema, se hace un análisis geométrico basado en los triángulos que se forman entre el cuerpo del tráiler en cada instante de tiempo.

Primero, se efectúa el cálculo de las ecuaciones de las variables de posición y se describe su posición luego de un instante de tiempo Δt de retroceso (véase la figura 3).

Figura 3

Análisis con movimiento en retroceso en un instante de tiempo



En el análisis geométrico basado en los triángulos que se forman entre el cuerpo del tráiler en cada instante de tiempo, se tiene el triángulo formado por las ruedas de tracción en los puntos A y B, y donde z corresponde a la distancia recorrida en un instante de tiempo Δt , con lo que se generan las siguientes ecuaciones:

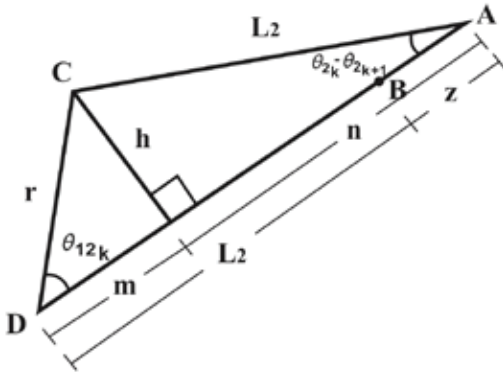
$$x_{k+1} - x_k = z \cos(\theta_k) \quad (1)$$

$$y_{k+1} - y_k = z \sin(\theta_k) \quad (2)$$

Ahora, el triángulo formado por los puntos ACD se observa en la figura 4.

Figura 4

Segundo triángulo para análisis del modelo matemático del tráiler



Relacionando los segmentos en el triángulo, se generan las siguientes ecuaciones:

$$m + n = L_2 + z \quad (3)$$

$$m = r \cos(\theta_{1k} - \theta_{2k}) \quad (4)$$

$$n = L_2 \cos(\theta_{2k} - \theta_{2k+1}) \quad (5)$$

Reemplazando las ecuaciones (4) y (5) en (3), se obtiene:

$$L_2 \cos(\theta_{2k} - \theta_{2k+1}) + r \cos(\theta_{1k} - \theta_{2k}) = L_2 + z \quad (6)$$

$$L_2 + r \cos(\theta_{1k} - \theta_{2k}) = L_2 + z \quad (7)$$

$$z = r \cos(\theta_{1k} - \theta_{2k}) \quad (8)$$

Definiendo por comodidad:

$$\theta_{12k} = \theta_{1k} - \theta_{2k} \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (8) en (1) y (2), se obtiene:

$$x_{k+1} = x_k + r \cos(\theta_{12k}) \cos(\theta_{2k}) \quad (10)$$

$$y_{k+1} = y_k + r \cos(\theta_{12k}) \sin(\theta_{2k}) \quad (11)$$

Se procede a realizar el cálculo de la ecuación de la orientación del cuerpo posterior del tráiler θ_2 :

$$h = r \sin(\theta_{12k}) \quad (12)$$

$$h = L_2 \sin(\theta_{2k} - \theta_{2k+1}) \quad (13)$$

Juntando ambas ecuaciones, (12) y (13):

$$\sin(\theta_{12k}) = L_2 \sin(\theta_{2k} - \theta_{2k+1}) \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que los valores en un instante k y un instante $k + 1$ son variaciones muy pequeñas, estas se consideran como casi iguales y, por lo tanto, su diferencia es un valor muy pequeño. Por eso, se toman ciertas medidas cuando se trabaja con pequeñas variaciones de los ángulos; así, dos valores de un ángulo en instantes de tiempo consecutivos α_k y α_{k+1} tienen las siguientes aproximaciones:

$$\sin(\alpha_k - \alpha_{k+1}) \approx \alpha_k - \alpha_{k+1} \quad (15)$$

$$\cos(\alpha_k - \alpha_{k+1}) \approx 1$$

Utilizando en la ecuación (14) el criterio descrito en (15), se obtiene:

$$r \sin(\theta_{12k}) = L_2(\theta_{2k} - \theta_{2k+1}) \quad (16)$$

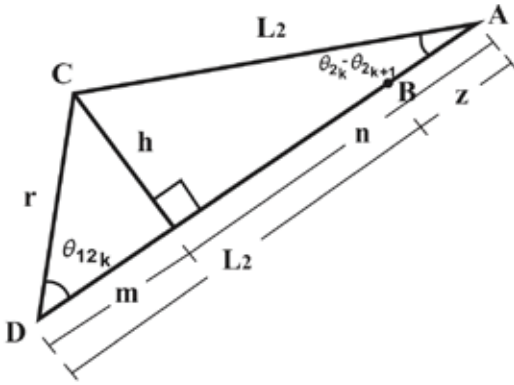
Despejando se obtiene:

$$\theta_{2k+1} = \theta_{2k} - \frac{r}{L_2} \sin(\theta_{12k}) \quad (17)$$

Ahora, para calcular el ángulo de orientación de la parte del tractor, se analiza el triángulo formado por los puntos CEF mostrado en la figura 5.

Figura 5

Tercer triángulo para análisis del modelo matemático del tráiler



Relacionando los segmentos en el triángulo, se generan las siguientes ecuaciones:

$$a + b = L_1 + r \quad (18)$$

$$a = \frac{h}{\tan(\delta_k)} \quad (19)$$

$$h = L_1 \sin(\theta_{1k} - \theta_{1k+1}) \quad (20)$$

$$b = L_1 \cos(\theta_{1k} - \theta_{1k+1}) \quad (21)$$

Reemplazando (20) en (19), y (19) con (21) en (18), se obtiene:

$$\frac{L_1 \sin(\theta_{1k} - \theta_{1k+1})}{\tan(\delta_k)} + L_1 = L_1 + r \quad (22)$$

Aplicando el criterio de (15) en (22) y despejando, se obtiene:

$$\frac{L_1(\theta_{1k} - \theta_{1k+1})}{\tan(\delta_k)} = r \quad (23)$$

Despejando el ángulo en el instante de tiempo $k + 1$, se obtiene:

$$\theta_{1k+1} = \theta_{1k} - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \quad (24)$$

Utilizando la ecuación (9) para un instante de tiempo $k + 1$, se llega a la fórmula para el cálculo del ángulo de unión de los cuerpos θ_{12} .

$$\theta_{1k+1} = \theta_{1k} - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) - \theta_{2k} + \frac{r}{L_2} \sin(\theta_{12k}) \quad (25)$$

Sabiendo que $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$ y acomodando la ecuación, se obtiene:

$$\theta_{12k+1} = \theta_{12k} + \frac{r}{L_2} \sin(\theta_{12k}) - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \quad (26)$$

Mediante este procedimiento, se logra obtener las ecuaciones del sistema en tiempo discreto:

$$x_{k+1} = x_k + r \cos(\theta_{12k}) \cos(\theta_{2k}) \quad (27)$$

$$y_{k+1} = y_k + r \cos(\theta_{12k}) \sin(\theta_{2k}) \quad (28)$$

$$\theta_{2k+1} = \theta_{2k} - \frac{r}{L_1} \sin(\theta_{12k}) \quad (29)$$

$$\theta_{1k+1} = \theta_{1k} - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \quad (30)$$

$$\theta_{12k+1} = \theta_{12k} + \frac{r}{L_2} \sin(\theta_{12k}) - \frac{r}{L_1} \tan(\delta_k) \quad (31)$$

Pasando las ecuaciones del sistema de tiempo discreto a tiempo continuo:

$$\dot{x} = v \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_2) \quad (32)$$

$$\dot{y} = v \cos(\theta_{12}) \sin(\theta_2) \quad (33)$$

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) \quad (34)$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{v}{L_1} \tan(\delta) \quad (35)$$

$$\dot{\theta}_{12} = \frac{v}{L_2} \sin(\theta_{12}) - \frac{v}{L_1} \tan(\delta) \quad (36)$$

Una vez establecidas las ecuaciones de modelado del robot tipo tráiler, se deberá definir las variables de estado que se van a utilizar en el sistema de control. Considerando que el vehículo realiza un movimiento en retroceso a una velocidad constante ($v = \text{const.}$) y se lleva a cabo una aproximación del modelo basado en puntos de referencia como $y \approx 0$, $\theta_2 \approx 0$, $\theta_{12} \approx 0$, se define el vector de estado x y la señal de control u :

$$x = [y \quad \theta_2 \quad \theta_{12}] \quad (37)$$

$$u = \tan(\delta) \quad (38)$$

Luego, se desarrolla un método para determinar los valores de referencia para casos de trayectoria lineal, definiendo la ecuación respectiva para cada variable de estado y de control a fin de que el controlador lleve al robot por dicha trayectoria. Para la trayectoria lineal, se observa cómo es la trayectoria que seguirá el robot móvil y los parámetros para el análisis de las variables deseadas requeridas, para lo cual se efectúa el análisis geométrico, despejando con respecto a y^* (Medina Medina, 2018):

$$y^* = \frac{x \tan \theta_2^* + y \tan^2 \theta_2^* + b}{1 + \tan^2 \theta_2^*} \quad (39)$$

Se obtiene el valor deseado de y para una línea recta con pendiente igual a θ_2 .

Además, se desarrolla un método para determinar el valor de referencia para casos de trayectoria circular, definiendo la ecuación para cada variable de estado y de control a fin de que el controlador lleve al robot por dicha trayectoria. Se observa cómo es la trayectoria circular que seguirá el robot móvil y los parámetros para el análisis de las

variables deseadas requeridas. Realizando el análisis geométrico para la trayectoria circular, se llega a la siguiente ecuación (Medina Medina, 2018):

$$y^* = \frac{R (y - y_c)}{\sqrt{(y - y_c)^2 + (x_c - x)^2}} + y_c \quad (40)$$

$$\theta_2^* = \tan^{-1} \left(\frac{x_c - x}{y - y_c} \right) \quad (41)$$

$$\theta_{12}^* = \tan^{-1} \left(\frac{L_2}{R} \right) \quad (42)$$

$$\delta^* = \tan^{-1} \left(\frac{L_1}{\sqrt{L_2^2 + R^2}} \right) \quad (43)$$

En este caso, es necesario calcular los valores deseados del ángulo θ_{12}^* y δ^* , debido al movimiento circular que se obtiene por la trayectoria. Estas variables, pese a ser constantes, requieren de un valor numérico específico de acuerdo con el tipo de movimiento circular dado.

Mediante la aplicación de una trayectoria de tipo sinusoidal, se desarrolla un procedimiento para definir las referencias de cada variable del sistema con base en una función general, de tal manera que cualquier tipo de trayectoria, capaz de definirse con base en una función matemática, se integre como trayectoria deseada al sistema. En este caso, se obtienen los valores deseados de las variables del sistema para que cumplan frente a cualquier tipo de trayectoria definida por una función matemática.

Para encontrar las ecuaciones que cumplan con una función general, se realiza el análisis utilizando una función sinusoidal con el objetivo de que al final se la reemplace por una función general. Utilizando la trayectoria sinusoidal se expresan las ecuaciones siguientes para cualquier función dependiente de x . De esta manera, se tienen cuatro ecuaciones de referencia para las variables de estado y de control en función de cualquier tipo de trayectoria que sea expresada en una función (Medina Medina, 2018).

$$y^* = f(x) \quad (44)$$

$$\theta_2^* = \tan^{-1}(f'(x)) \quad (45)$$

$$\theta_{12}^* = \tan^{-1}(-L_2 f''(x) \cos^3(\theta_2)) \quad (46)$$

$$= \text{atan} \left(L_1 L_2 f'''(x) \cos^4(\theta_2) \cos^3(\theta_{12}) + \frac{L_1}{L_2} \sin(\theta_{12}) (1 - 1,5 \tan(\theta_2) \sin(2\theta_{12})) \right) \quad (47)$$

Cálculo de los parámetros del controlador

Las ganancias son calculadas definiendo los pesos de la matriz Q , con tal de generar la respuesta óptima del sistema. Para corroborar una adecuada respuesta del sistema, se deben considerar dos aspectos:

- Los autovalores del sistema en lazo cerrado deben tener parte real negativa.
- Es necesario verificar una adecuada respuesta de control.

La correcta selección de los pesos de la matriz Q depende de analizar la respuesta del sistema, normalmente frente a una entrada escalón en cada variable, y ver cómo responde el sistema frente a esta entrada. Así, después de varias pruebas, se define el mejor valor de los pesos de acuerdo con dichas respuestas.

En este caso, se realizarán tres pruebas con variaciones en los pesos de la matriz Q , donde la entrada al sistema será la referencia en las tres variables: $y^* = 0, \theta_2^* = 0, \theta_{12}^* = 0$.

Antes de suministrar al modelo las referencias en cada variable de estado, se debe verificar que la matriz en lazo cerrado ($A - BK$) sea estable. Se realizan las siguientes tres pruebas; utilizando el algoritmo en MATLAB™, se analizan los autovalores en lazo cerrado y su respuesta para valores iniciales:

$$x_i = 150, \quad y_i = -20, \quad \theta_{1i} = -75^\circ, \quad \theta_{2i} = -30^\circ$$

Prueba 1. Ganancias del controlador

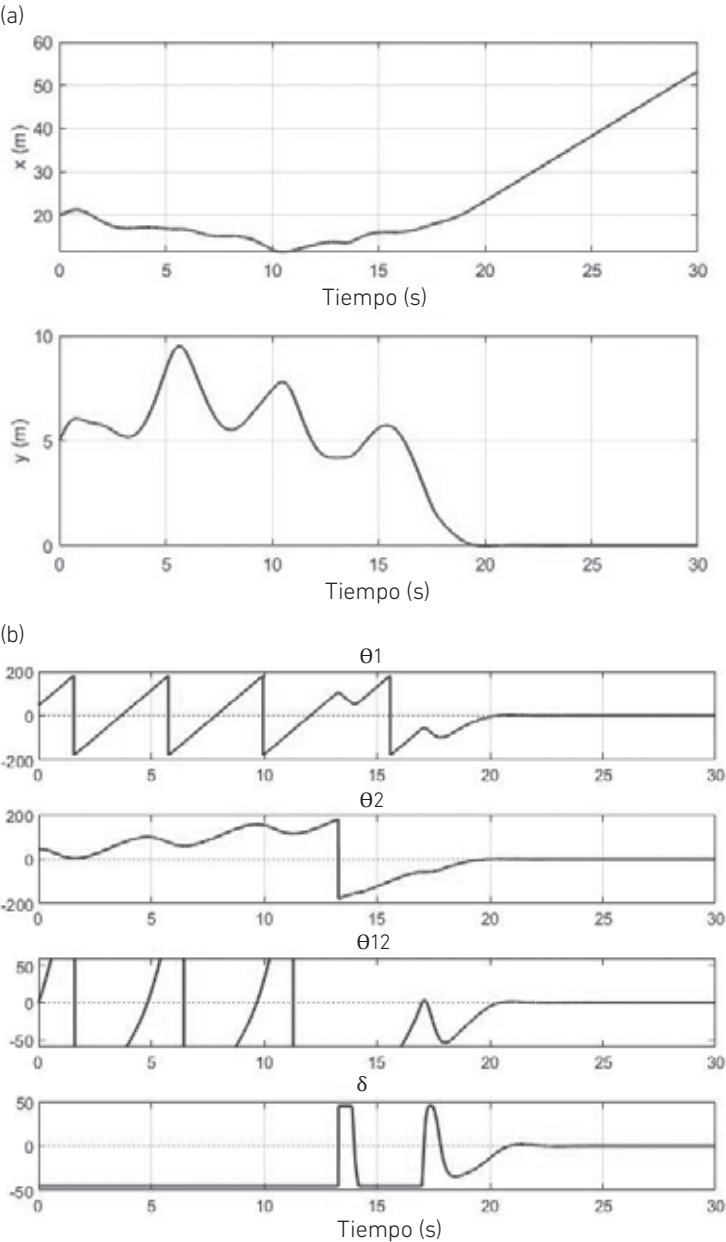
Se coloca peso solo a la variable y : $q_y = 1e1, \quad q_{\theta_2} = 0, \quad q_{\theta_{12}} = 0$

Los autovalores del sistema en lazo cerrado son: $-2.2455; -1.1209 + j1.8699; -1.1209 - j1.8699$.

Todos tienen parte real negativa; entonces, el sistema en lazo cerrado es estable y con una respuesta como la que se observa en la figura 6.

Figura 6

Prueba 1 con controlador LQR



Prueba 2. Ganancias del controlador

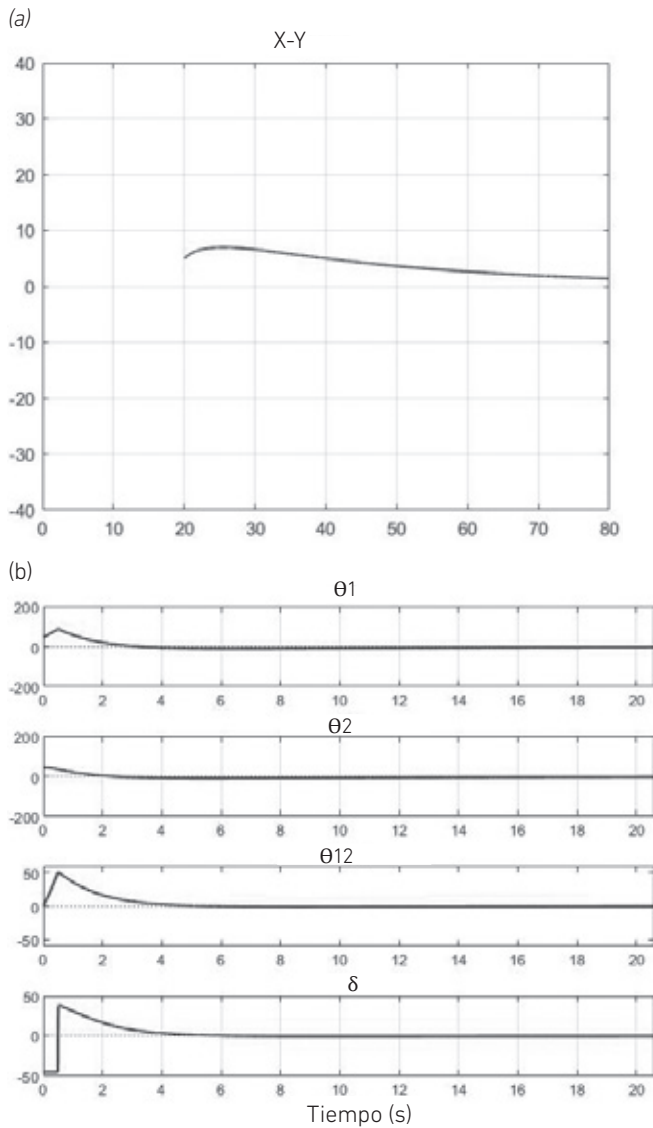
Se coloca peso en todas las variables: $q_y = 1e1$, $q_{\theta_2} = 1e4$, $q_{\theta_{12}} = 1e4$

Los autovalores del sistema en lazo cerrado son: -150 ; -0.0956 ; -0.7439 .

Todos tienen parte real negativa; entonces, el sistema en lazo cerrado es estable y con una respuesta como la que se observa en la figura 7.

Figura 7

Prueba 2 con controlador LQR



Nota. (a) Plano X-Y. (b) Ángulos del sistema.

Prueba 3. Ganancias del controlador

Se coloca peso en todas las variables: $q_y = 1e3$, $q_{\theta_2} = 1e4$, $q_{\theta_{12}} = 1e4$.

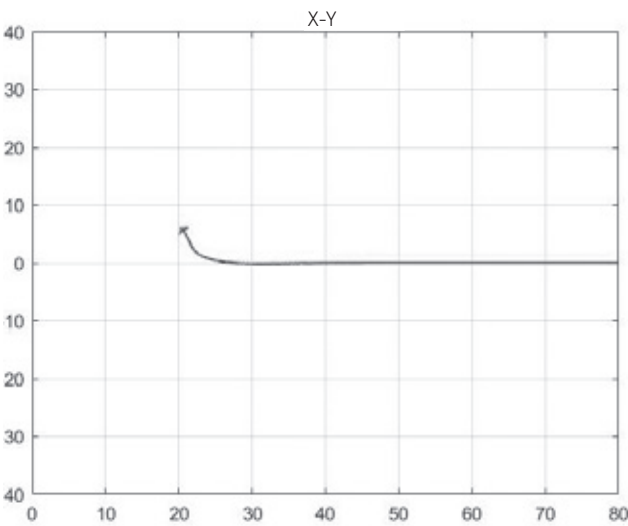
Los autovalores del sistema en lazo cerrado son: -150 ; $-0.7 + j0.46$; $-0.7 - j0.46$.

Todos tienen parte real negativa; entonces, el sistema en lazo cerrado es estable y con una respuesta como la que se observa en la figura 8.

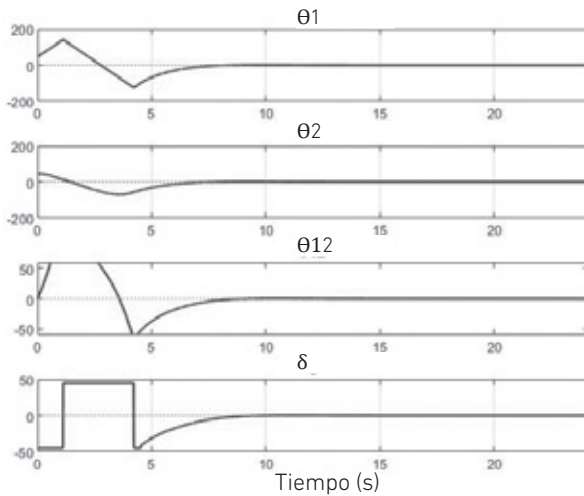
Figura 8

Prueba 3 con controlador LQR

(a)



(b)



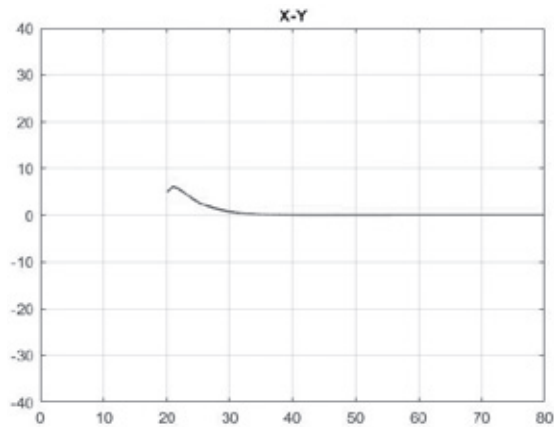
Nota. (a) Plano X-Y. (b) Ángulos del sistema.

Se observa en la primera prueba que la respuesta del sistema se va a valores alejados de la referencia y con una respuesta de movimiento rara. En cambio, en las pruebas 2 y 3, ya se ve una mejora en la respuesta y con la intención de converger a los valores deseados. La prueba 2 tiene un movimiento suave, pero se demora en converger, mientras que la prueba 3 tiene un movimiento más brusco, pero converge más rápido. La idea es ir jugando con los pesos hasta obtener una respuesta óptima; para eso, se eligieron los siguientes valores de los pesos: $q_y = 5e2$, $q_{\theta_2} = 1e4$, $q_{\theta_{12}} = 1e4$. Estos valores generan los siguientes autovalores en lazo cerrado: -150 ; $-0.63 + j0.33$; $-0.63 - j0.33$. La respuesta del sistema es como la que se observa en la figura 9.

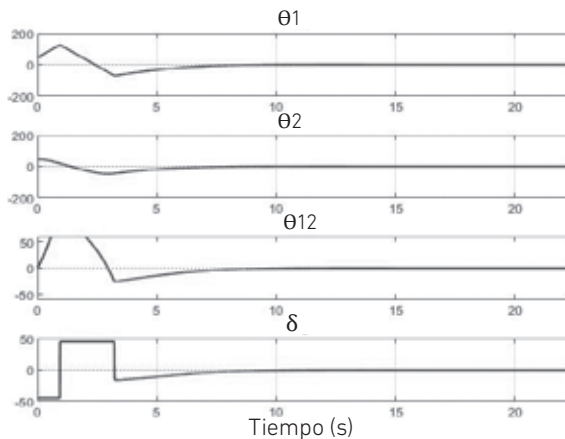
Figura 9

Prueba 4 con controlador LQR

(a)



(b)



Nota. (a) Plano X-Y. (b) Ángulos del sistema.

De esta manera se genera una adecuada convergencia del sistema hacia sus valores deseados. Aun así, pese a su adecuada convergencia, una variable del sistema llega a trabajar fuera del rango permisible. Se trata de la variable θ_{12} que corresponde al ángulo de unión entre los dos cuerpos —que no debe exceder un rango de $[-90^\circ$ a $90^\circ]$ — y que no es limitada por el programa porque no es una variable de control, sino una variable de estado generada automáticamente por el sistema. Como consecuencia, en ciertos momentos, dicho ángulo excede el rango permisible y genera un mal funcionamiento en la respuesta del sistema. Es necesario evitar que se produzca este fallo.

La solución consiste en variar el valor de los pesos hasta reducir el esfuerzo de este ángulo. Así se hizo en la prueba 2, donde el ángulo tiene un valor bajo, lo que genera que su respuesta sea muy lenta. Entonces, lo ideal es determinar una solución para poner el límite al ángulo θ_{12} y que a su vez determine una adecuada y rápida convergencia. Para esto se propone como solución integrar la lógica difusa aplicada a la señal de control bajo el análisis del ángulo θ_{12} (Gupta & Chauhan, 2015).

Diseño de la red neurodifusa

Para fortalecer la lógica que permite compensar el ángulo θ_{12} , se realiza la unión de la lógica difusa con la red neuronal para obtener una red neurodifusa a fin de lograr una *performance* más segura y robusta. Se mantiene el enfoque de buscar llevar el ángulo θ_{12} a un valor pequeño para evitar que los cuerpos del tráiler lleguen a colisionar y causen daños graves, de tal manera que se siga aplicando la ley de control para el modelo lineal.

La integración de la red neuronal con la lógica difusa parte de utilizar las neuronas que integran una función matemática para reemplazar las funciones de pertenencia de la lógica difusa. En este reemplazo, se busca pasar de una función de pertenencia triangular a una función gaussiana en neuronas y una función de pertenencia trapezoidal en una función sigmoidea en neuronas (Alsharkawi et al., 2020).

En las figuras 10 y 11 se observa la similitud entre los dos tipos de funciones y su equivalente para cada tipo de gráfica. Se muestra cómo definir las funciones de pertenencia de la lógica difusa en una forma basada en función matemática.

Figura 10
Comparación entre función trapezoidal y función sigmoidea

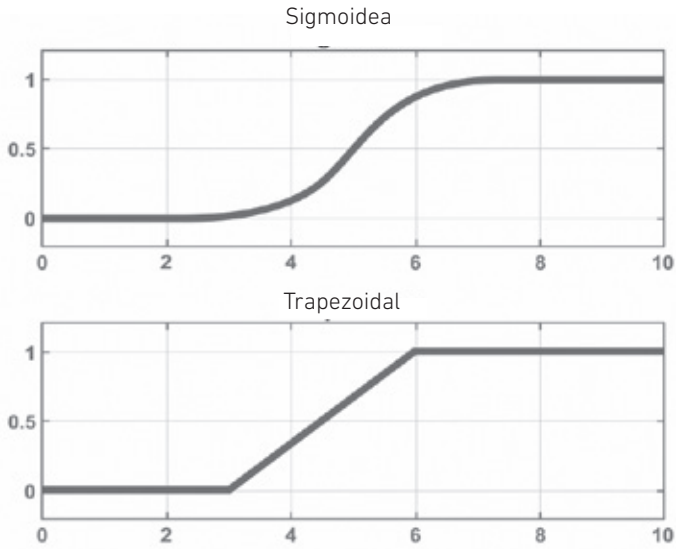
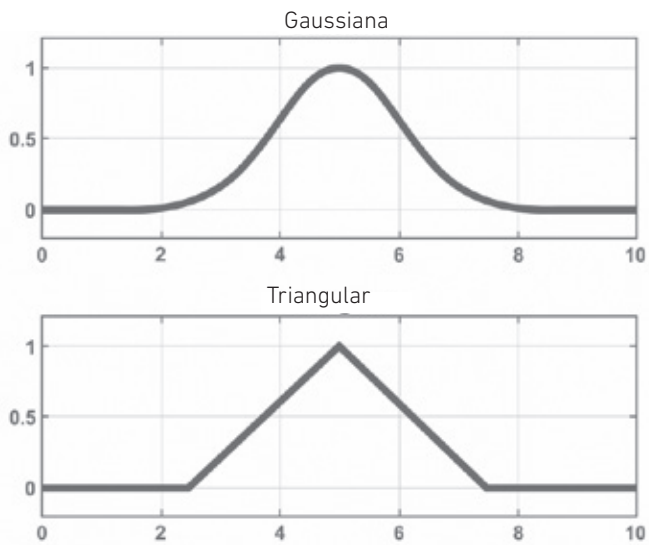


Figura 11
Comparación entre función triangular y función gaussiana



Estas conversiones permitirán definir un comportamiento de transformación más amortiguado en los puntos de cambio de los extremos.

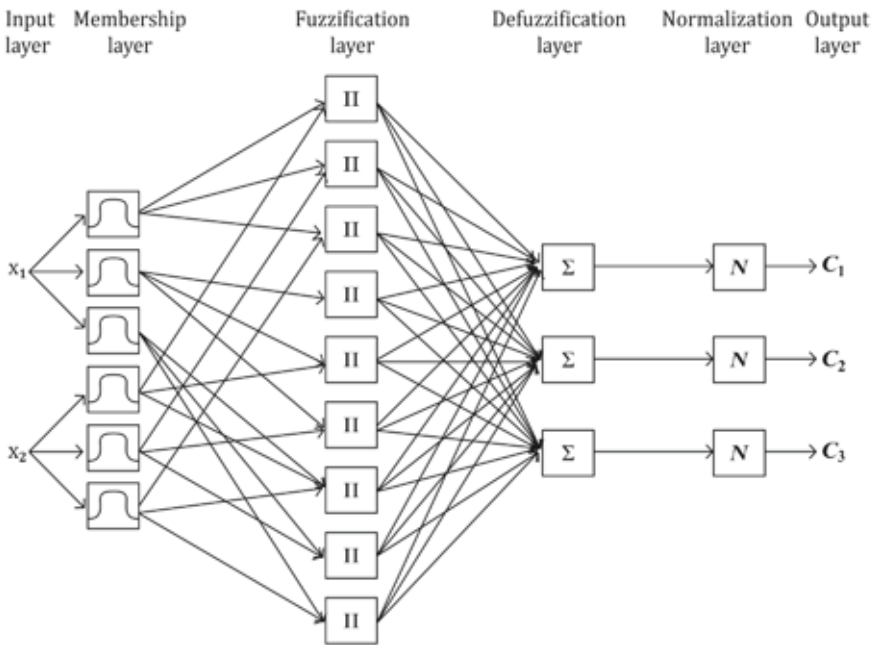
Las entradas realizarán el ingreso a sus correspondientes neuronas según su función de pertenencia y, al final, estas se multiplicarán con la correspondiente salida de neurona según su posición (para el caso de dos o más entradas). En otras palabras, la salida de cada neurona según su posición de función de pertenencia se multiplica con su respectiva de la otra entrada.

Finalmente, las salidas de cada bloque de multiplicación se suman el número de veces correspondientes a las salidas esperadas, las cuales pueden llegar a requerir una normalización para adecuar la salida a los límites de las señales de salida.

En la figura 12, se muestra un ejemplo de una red neurodifusa para un sistema de dos entradas y tres salidas, que incluye todas las etapas de la red neurodifusa.

Figura 12

Red neurodifusa para un sistema de dos entradas y tres salidas



Nota. El bloque N hace referencia a una función de normalización de la señal de salida para que sea acorde al rango esperado. De "A Neuro-fuzzy Approach in the Classification of Students' Academic Performance", por Q. H. Do y J. F. Chen, 2013, *Computational Intelligence and Neuroscience* (<https://doi.org/10.1155/2013/179097>). Derechos de autor 2013 Quang Hung Do y Jeng-Fung Chen.

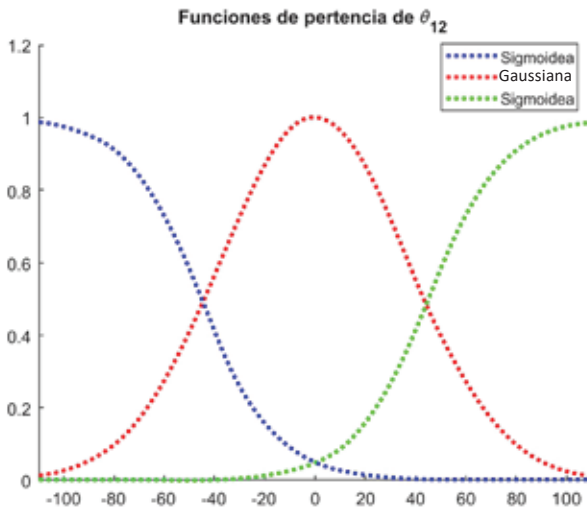
Pruebas de convergencia de la red neurodifusa

Para las pruebas de convergencia de la red neurodifusa, se utiliza el algoritmo en MATLAB™. Lo primero que se debe realizar es la transformación de la función de pertenencia en lógica difusa a su forma basada en sigmoideas y gaussianas equivalente, para realizar el proceso neurodifuso.

En la figura 13 se muestra la función de pertenencia basada en sigmoidea y gaussiana para la compensación del ángulo θ_{12} .

Figura 13

Función de pertenencia neurodifusa para el tráiler



Recordando las ecuaciones de las funciones sigmoidea y gaussiana:

$$\text{Sigmoidea} = \frac{1}{\left(1 + e^{\frac{\theta_{12}-c}{a}}\right)}$$

$$\text{Gaussiana} = e^{-\left(\frac{\theta_{12}-c}{a}\right)^2}$$

Donde a referencia la inclinación de la función entre el rango de trabajo y c referencia al valor central de la función.

El ajuste de la forma de las funciones se debe realizar manualmente, esperando adecuarse a la forma de la función de pertenencia de la lógica difusa. Para la función de pertenencia definida, se utilizaron los siguientes parámetros:

Función sigmoidea (izquierda): $a = 18$, $c = -45$

Función gaussiana: $a = 52,5$, $c = -45$

Función sigmoidea (derecha): $a = 18$, $c = -45$

Las siguientes pruebas se realizaron utilizando el algoritmo en MATLAB™.

Prueba 4

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 14 y 15: $x_i = 10$, $y_i = 15$, $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $y^* = 0$

Figura 14

Prueba 4 de la respuesta del sistema de control híbrido: variables del sistema

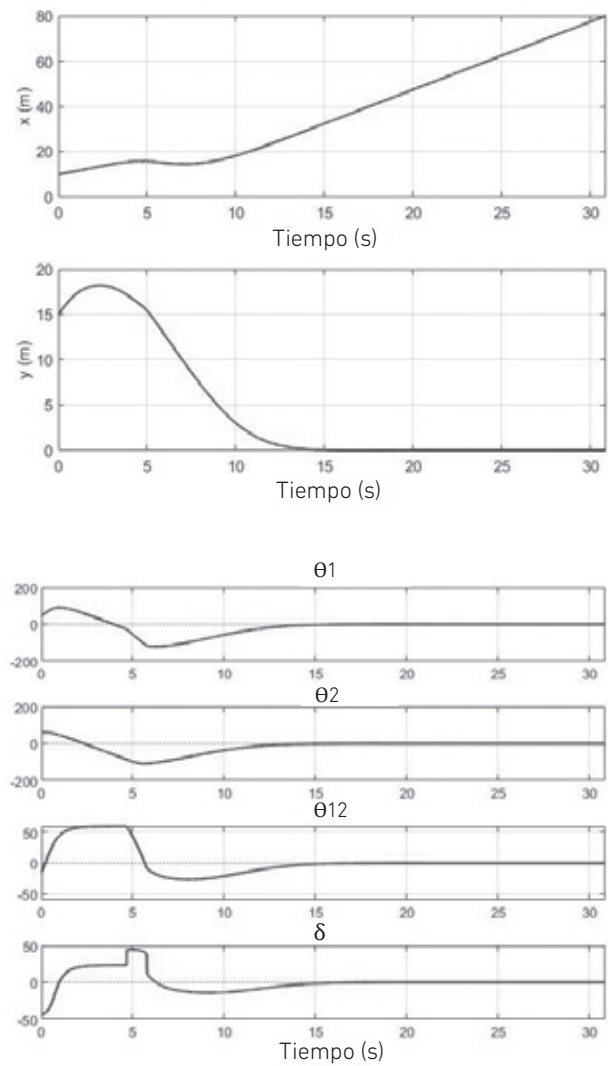
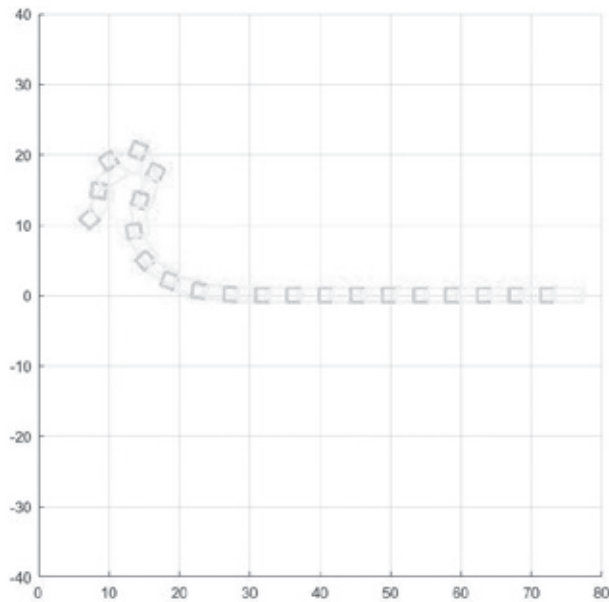
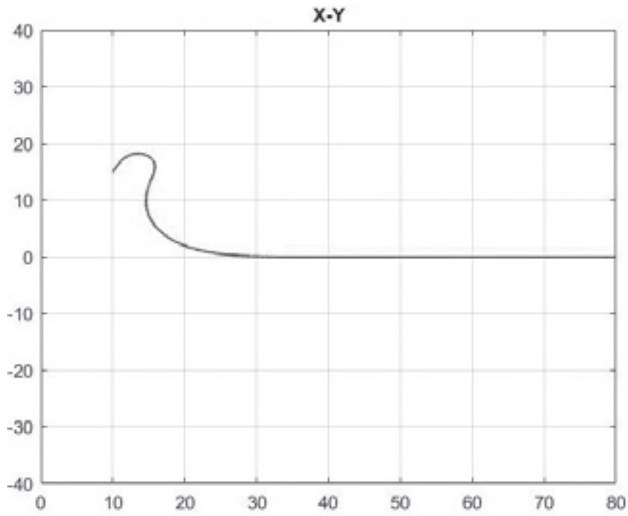


Figura 15

Prueba 4 de la respuesta del sistema neurodifuso: movimiento del tráiler



Prueba 5

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 16 y 17: $x_i = 10$, $y_i = 15$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $y^* = 0$.

Figura 16

Prueba 5 de la respuesta del sistema neurodifuso: variables del sistema

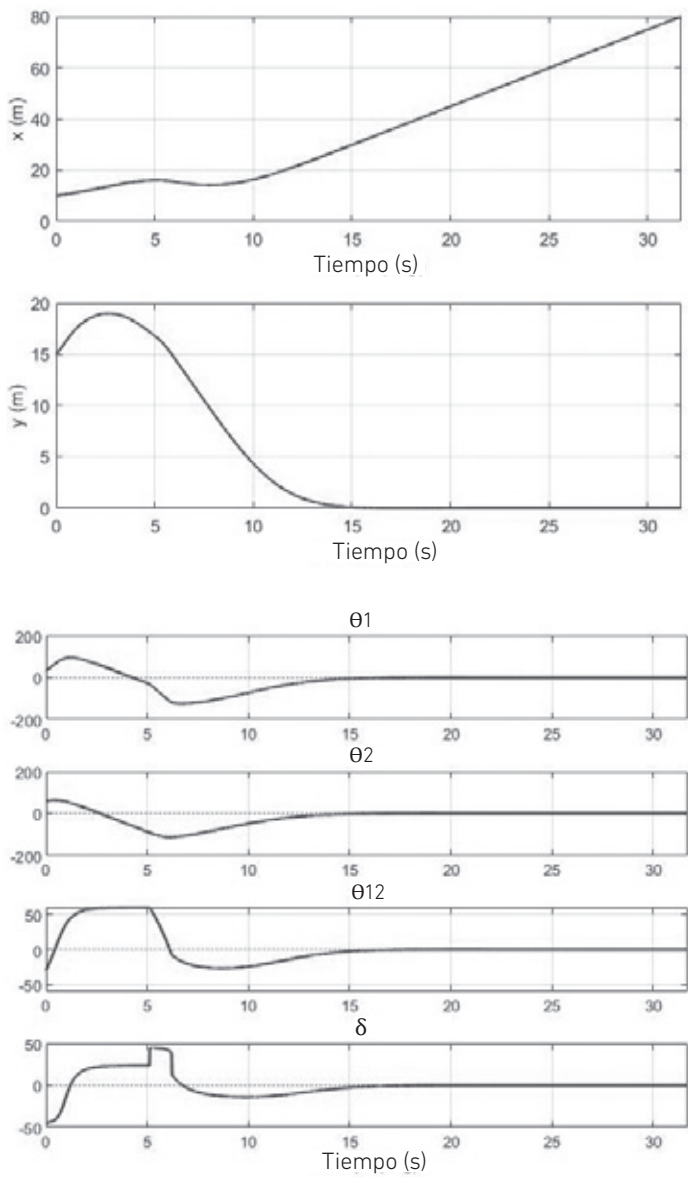
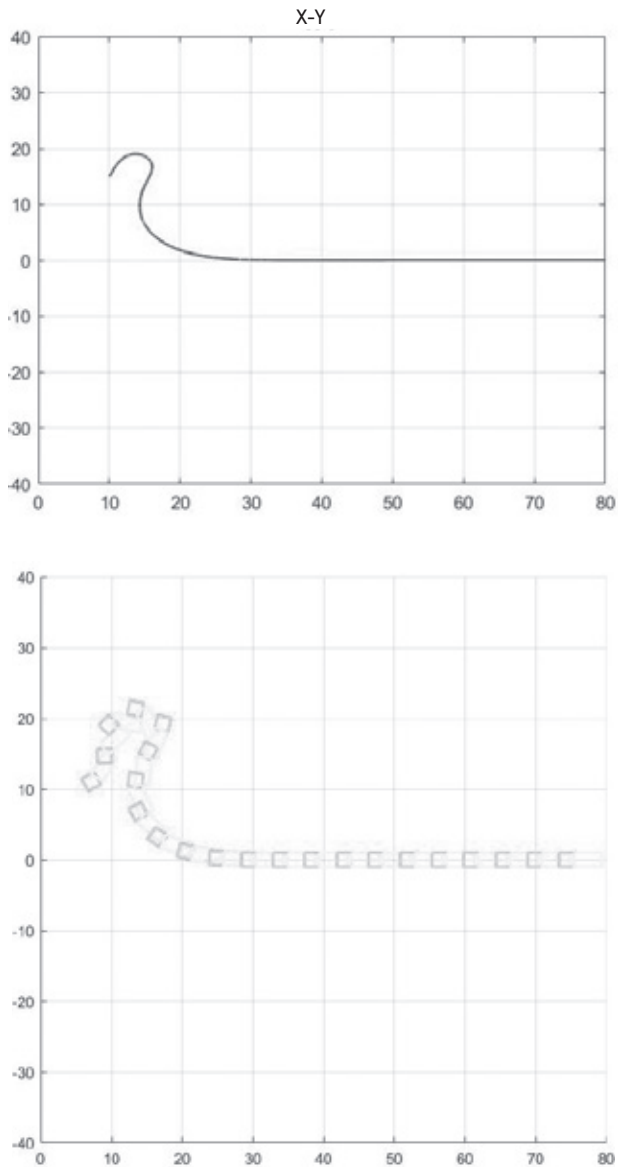


Figura 17

Prueba 5 de la respuesta del sistema neurodifuso: movimiento del tráiler



Prueba 6

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 18 y 19: $x_i = 20$, $y_i = -25$, $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$, $y^* = 0$.

Figura 18

Prueba 6 de la respuesta del sistema neurodifuso: variables del sistema

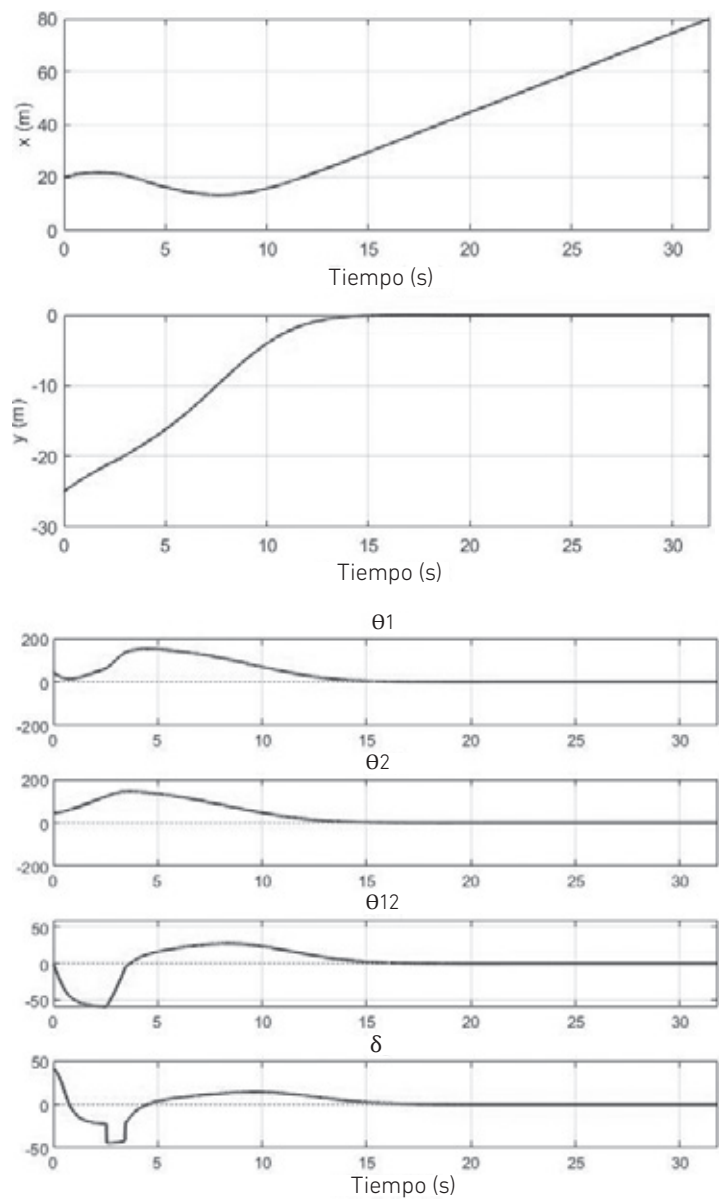
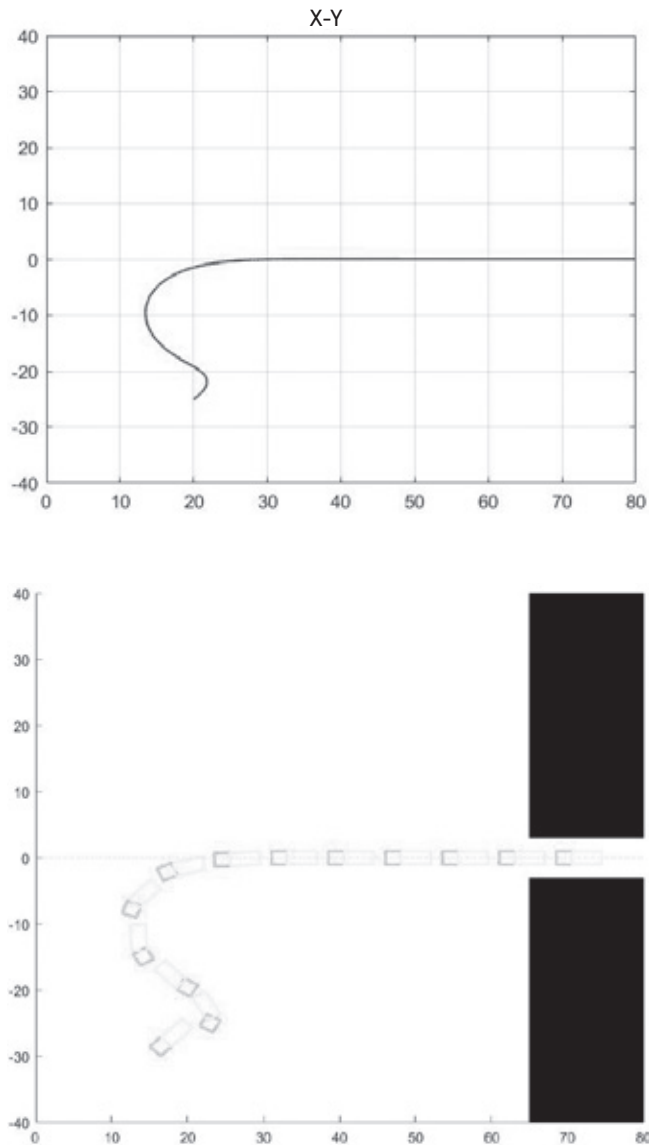


Figura 19

Prueba 6 de la respuesta del sistema neurodifuso: movimiento del tráiler



Se logra observar cómo se llega a obtener una óptima respuesta del control del tráiler empleando una red neurodifusa, lo que permite utilizar un controlador de compensación más robusto del ángulo θ_{12} y que puede ser implementado de una forma práctica.

En este caso, el control basado en una red neurodifusa, que se enfoca en la minimización del ángulo θ_{12} , se aplica utilizando las funciones matemáticas que representan

dichas funciones diseñadas en la lógica difusa, de manera que se pueda usar la conexión de señales mediante redes neuronales.

Esta forma de uso de la red neurodifusa se diferencia en otro tipo de aplicaciones, en las que se logra integrar las redes neuronales para la etapa de control del modelo lineal; o también en la inclusión de únicamente redes neuronales para la parte de minimización del ángulo θ_{12} , en la que se mantienen dos estrategias de control: una mediante el control lineal bajo un punto de operación y otra mediante la red neurodifusa para asegurar el ángulo de separación entre cuerpos, lo que es muy importante en la implementación y desempeño de los tráileres (Lu & Kintak, 2017).

Esto permite mostrar una estrategia distinta y práctica en la implementación de una red neurodifusa, que únicamente se concentra en el ángulo entre los cuerpos, y luego utilizar el control lineal para controlar el modelo linealizado del tráiler. De esta forma, se mantiene una robusta respuesta del sistema, pese a utilizar únicamente el modelo linealizado, pero que se repotencia con la ayuda de una red neurodifusa para la etapa de compensación de ángulo entre cuerpos.

Pruebas de convergencia con movimiento en avance

El análisis para el diseño del modelo matemático del tráiler considera un movimiento en retroceso (Medina Medina, 2018), lo cual genera una respuesta en retroceso en las pruebas realizadas. Pero el comportamiento real de un tráiler debe ser en ambos sentidos (retroceso y avance), por lo que se debe evaluar si dicho modelo matemático hace posible un movimiento en avance y si la estrategia de control propuesta permite el funcionamiento bajo esa consideración, admitiendo movimientos en simultáneo de acuerdo con los requerimientos del entorno de funcionamiento.

Ya que el modelo matemático del tráiler trabaja bajo una variable de velocidad igual a v , la cual genera un movimiento en retroceso, solo se debe cambiar el signo de dicha variable para generar un movimiento en avance, porque el análisis de desplazamiento es el mismo. Sin embargo, sí se debe analizar el proceso de control del sistema, ya que se enfoca en la dirección de ruedas que lleve al vehículo a cumplir los requerimientos de que θ_{12} sea pequeño, por lo que el comportamiento de la dirección de las ruedas del tráiler, definido por la variable δ , debe ser opuesto a cuando se va en retroceso:

- Movimiento en retroceso:
 - Si θ_{12} es negativo $\rightarrow$ dirección de las ruedas δ debe ser negativa
 - Si θ_{12} es positivo $\rightarrow$ dirección de las ruedas δ debe ser positiva
- Movimiento en avance:
 - Si θ_{12} es negativo $\rightarrow$ dirección de las ruedas δ debe ser positiva

Si θ_{12} es positivo $\rightarrow$ dirección de las ruedas δ debe ser negativa

Esto se debe a que el direccionamiento debe relacionarse con el tipo de movimiento del tráiler, ya sea en retroceso o en avance.

Mediante este análisis, se utiliza el algoritmo en MATLAB™ para realizar la demostración de funcionamiento en avance del tráiler. Se debe tener claro que se debe mantener la referencia de la etapa de linealización donde se realizó la aproximación de $\theta_2 \approx 0$, por lo que las referencias de ángulos y desplazamiento han de ser acordes a este punto de operación.

Prueba 7

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 20 y 21: $x_i = 60$, $y_i = 30$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -45^\circ$, $y^* = 0$.

Figura 20

Respuesta del sistema neurodifuso en avance: variables del sistema

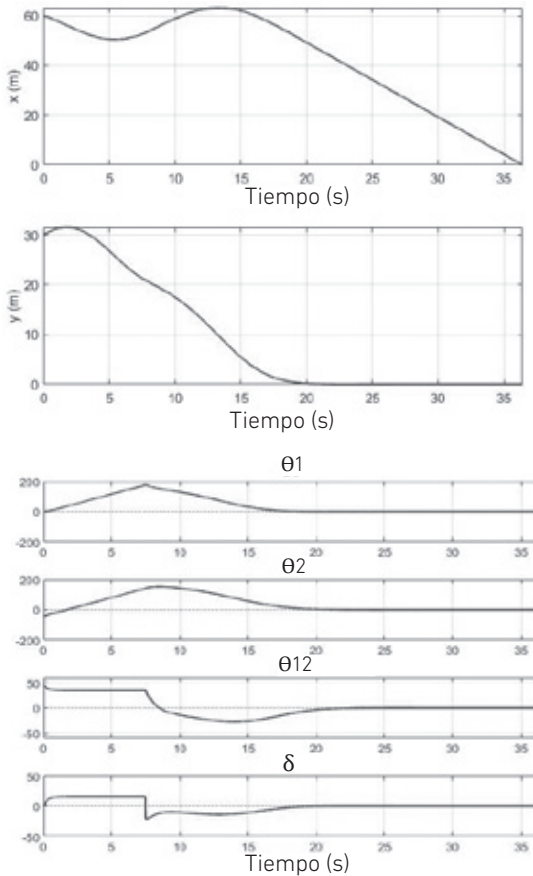
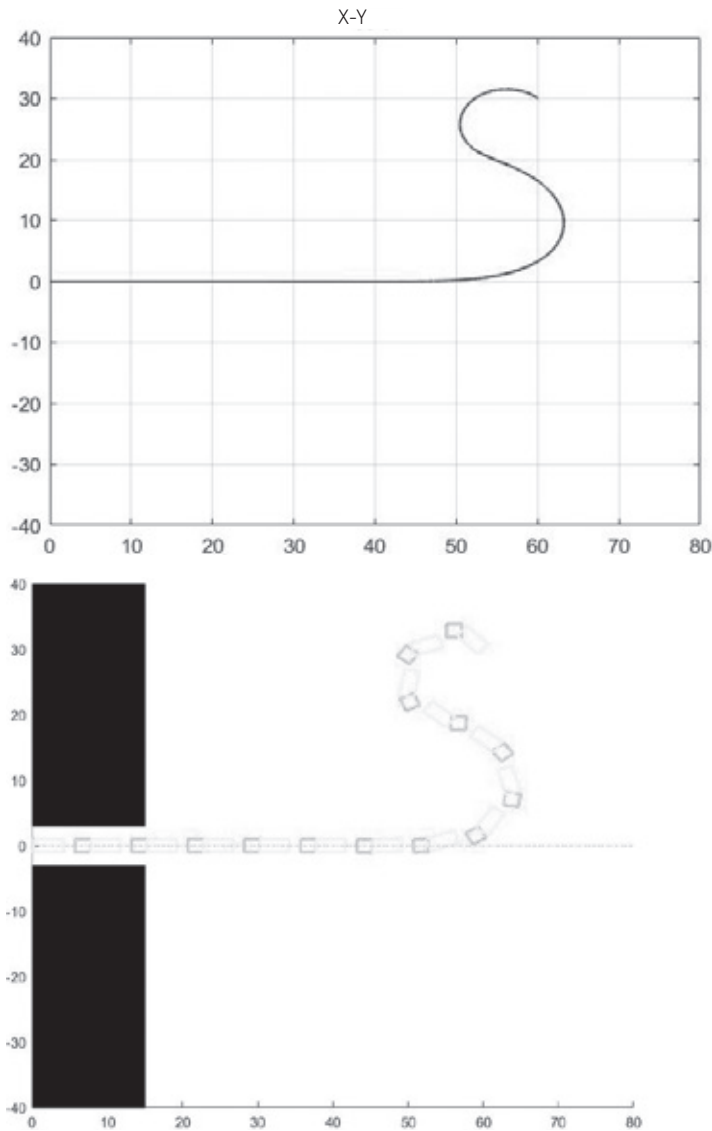


Figura 21

Respuesta del sistema neurodifuso en avance: movimiento del tráiler



La prueba 7 demuestra que el tráiler puede realizar movimiento en avance sin problema, utilizando el modelo matemático original estimado, bajo cambios en el signo de velocidad y dirección. Se muestra también que en avance, así como en retroceso, se busca mantener un ángulo del tráiler $\theta_{12} \approx 0$, ya que este es el punto de operación de la linealización realizada. Para poder visualizar el avance del tráiler en el otro sentido, solo se debe cambiar la perspectiva axial, para que la referencia del ángulo θ_2 sea la misma.

RESULTADOS

En la sección anterior se observó cómo llevar el robot móvil a una convergencia con respecto a un valor deseado de valor constante. Ahora se propone el seguimiento de trayectoria, en donde se definirán dos tipos de trayectorias básicas: lineal y circular; y cuando se tiene una trayectoria diseñada como una función general, partiendo del análisis de una señal sinusoidal.

El objetivo para el seguimiento de trayectoria es definir correctamente los valores deseados para cada caso a fin de llevar el tráiler por dicha trayectoria. Así, se deberán plantear las ecuaciones correspondientes para cada valor deseado en cada tipo de trayectoria sobre la base de un análisis geométrico que se realiza al conocer cómo debería ser el movimiento y qué parámetros están involucrados (Nawrocka et al., 2017).

Trayectoria general

En este caso, se definirán los valores deseados de las variables del sistema para que cumplan frente a cualquier tipo de trayectoria definida por una función matemática. Para encontrar las ecuaciones que cumplan con una función general, se realizará el análisis utilizando una función sinusoidal, con el objetivo de que al final se reemplace la función sinusoidal por una función general.

Realizando la prueba para una señal sinusoidal, utilizando el algoritmo en MATLAB™, se obtendrán las siguientes respuestas:

Prueba 8

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 22 y 23 con desplazamiento en retroceso:

$$x_i = 10, \quad y_i = 15, \quad \theta_{1i} = 60^\circ, \quad \theta_{2i} = 30^\circ$$

Figura 22
Prueba para trayectoria sinusoidal: variables del sistema

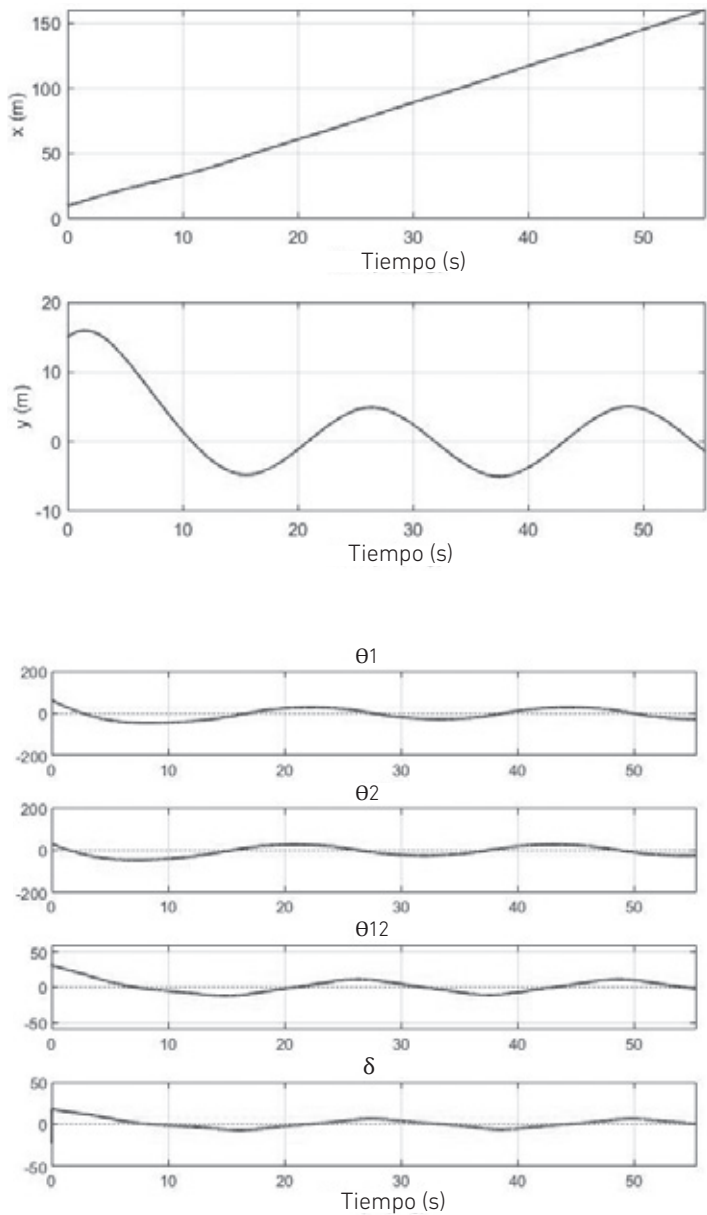
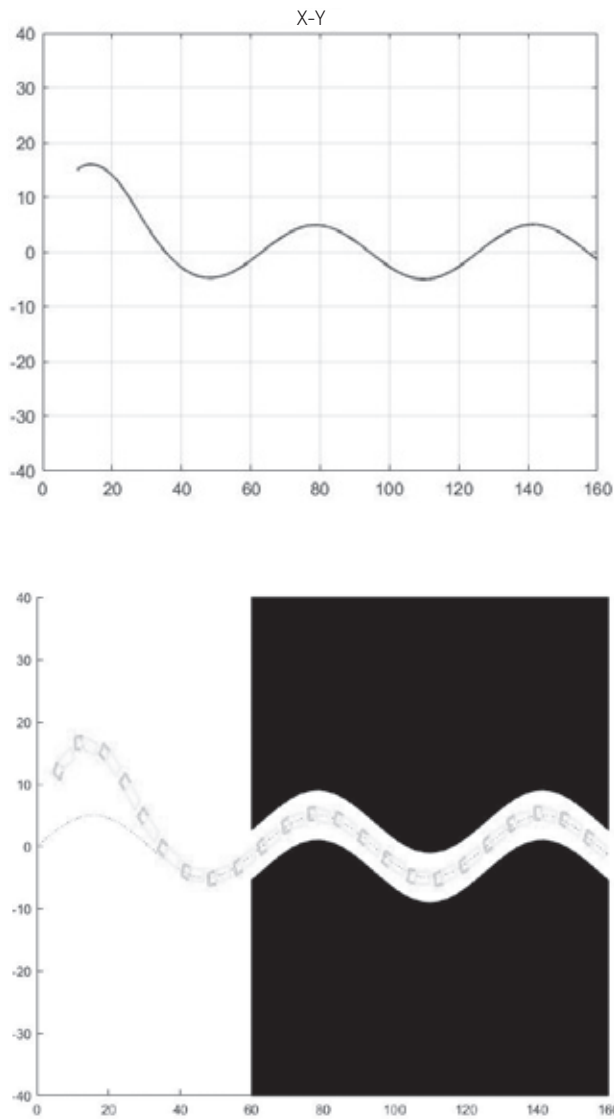


Figura 23

Prueba para trayectoria sinusoidal: movimiento del tráiler



Prueba 9

Con los valores iniciales y deseados que se indican a continuación, se obtienen las respuestas que señalan las figuras 24 y 25 con desplazamiento en avance:

$$x_i = 150, \quad y_i = -20, \quad \theta_{1i} = -75^\circ, \quad \theta_{2i} = -30^\circ$$

Figura 24

Prueba para trayectoria sinusoidal: variables del sistema

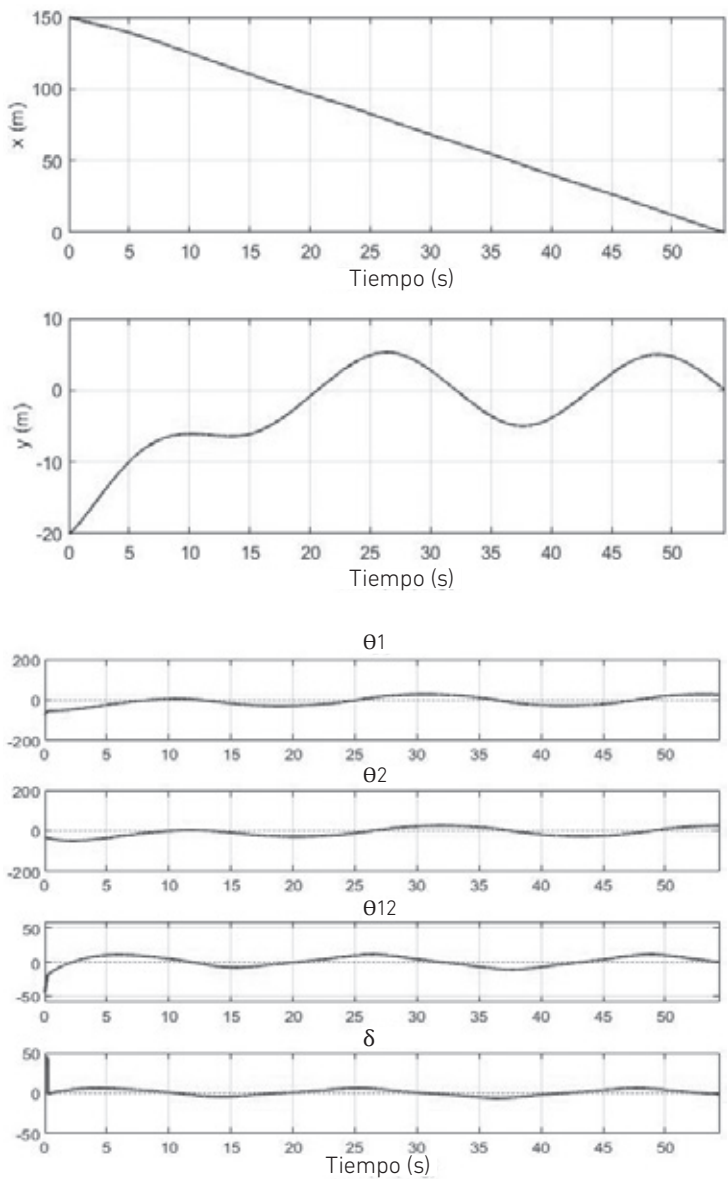
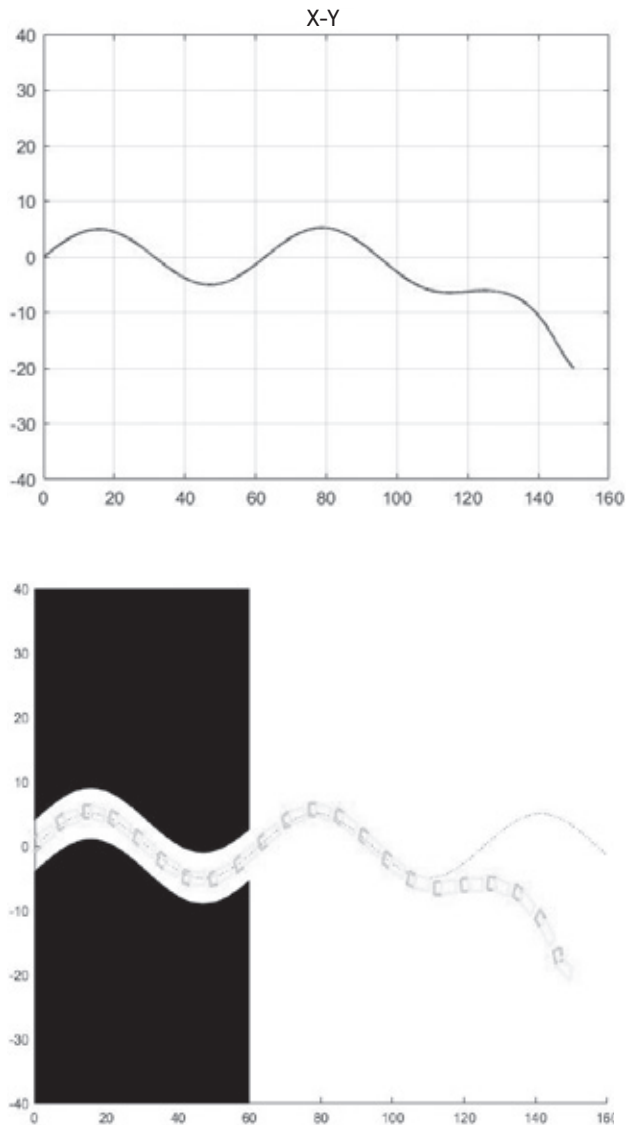


Figura 25

Prueba para trayectoria sinusoidal: movimiento del tráiler



Se observa que, para el caso de utilizar directamente una función matemática dependiente del tiempo mediante las ecuaciones de trayectoria general, se llega a obtener una buena respuesta del sistema sin la necesidad de cambiar los pesos para el cálculo de ganancia del controlador, por lo que se recomienda que, al momento de definir las trayectorias, deben ser representadas mediante una función matemática directamente.

Simulación del proceso de la propuesta de implementación

Luego de tener definidas las etapas de funcionamiento, coordenadas y trayectorias, se procede a realizar la simulación del proceso completo, de tal manera que corrobore que es posible realizar el proceso de transporte de carga con un correcto seguimiento de trayectoria del robot móvil tipo tráiler. Se lleva a cabo la siguiente prueba utilizando el algoritmo en MATLAB™, donde se puede variar la posición inicial, la posición de puerta de carga y la posición final para el recorrido del robot tipo tráiler. Para efectos de mejor comprensión, se muestra la trayectoria de partida desde el punto de origen hacia el almacén y la trayectoria desde el almacén hacia el punto de destino (figura 26), el proceso completo (figura 28) y, finalmente, los valores de las variables del proceso autónomo (figura 29).

Prueba 10

Posición inicial: 2. Posición de carga/descarga: 3. Posición final: 1.

Figura 26

Prueba 10: recorrido total del robot tipo tráiler dentro de un almacén

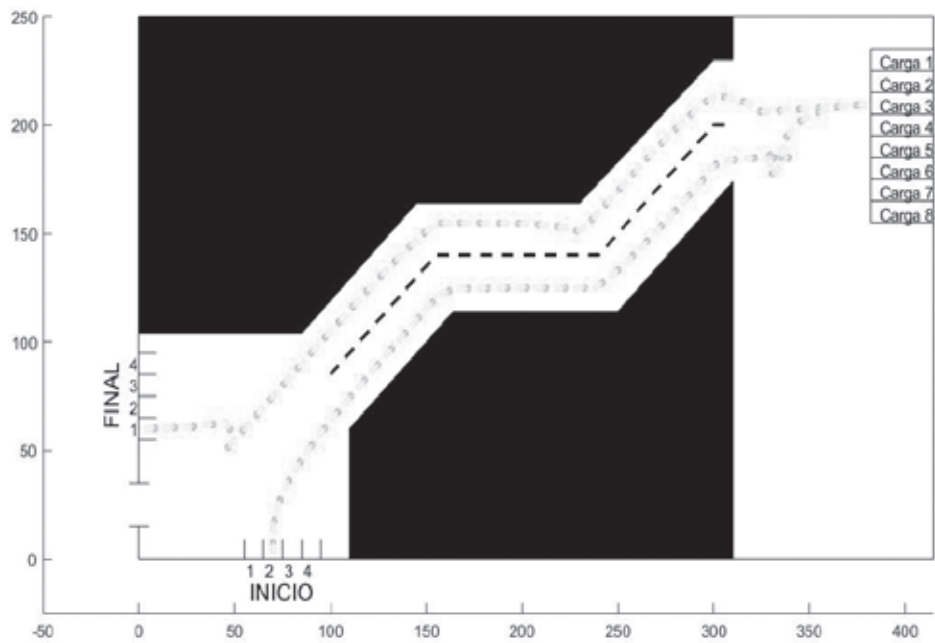
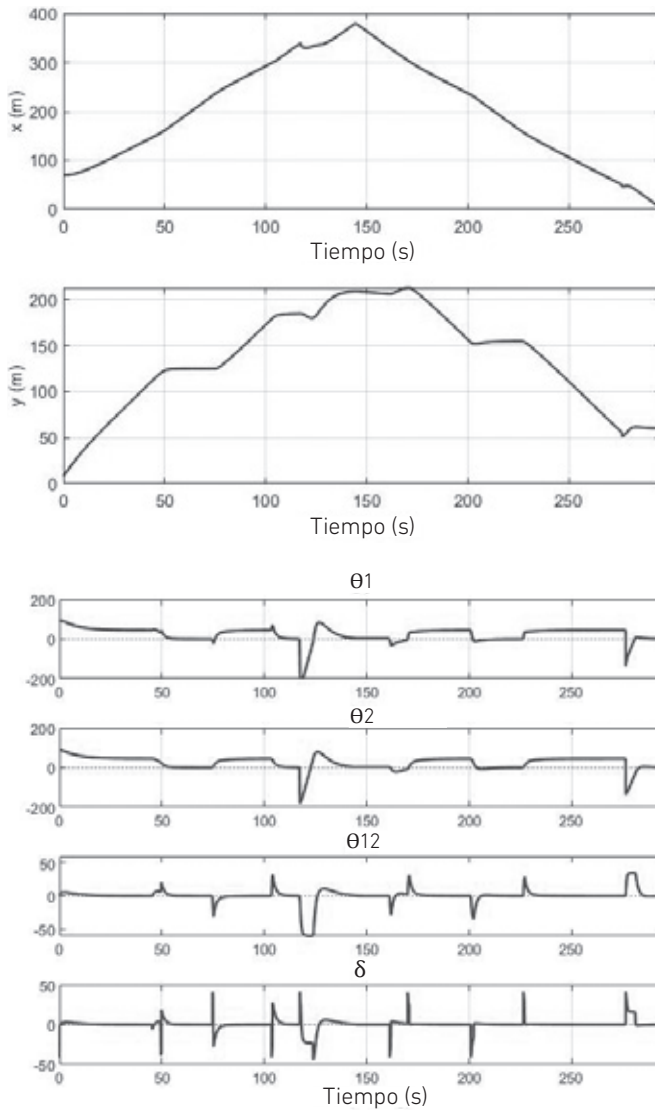


Figura 27

Prueba 10: variables del robot tipo tráiler durante el recorrido



Prueba 11

Posición inicial: 2. Posición de carga/descarga: 8. Posición final: 4.

Figura 28
Recorrido total del robot tipo tráiler dentro de un almacén

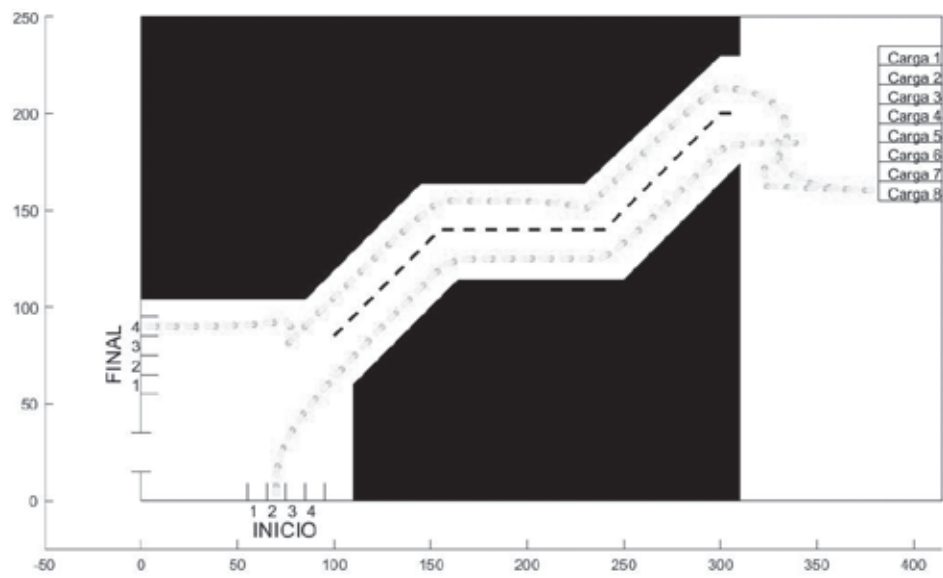
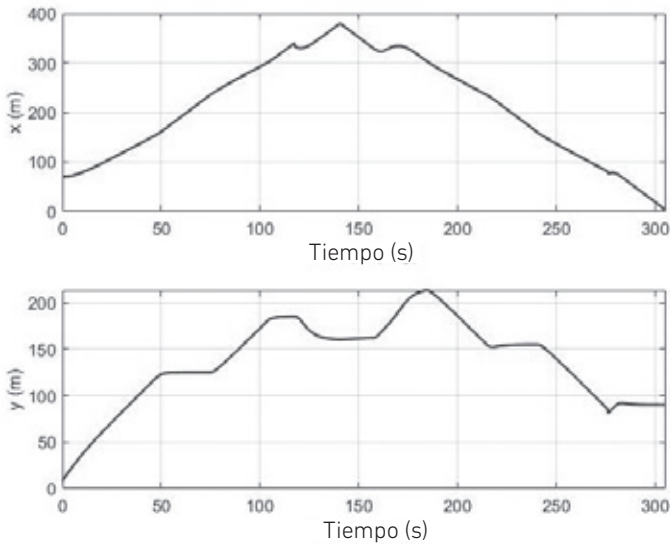
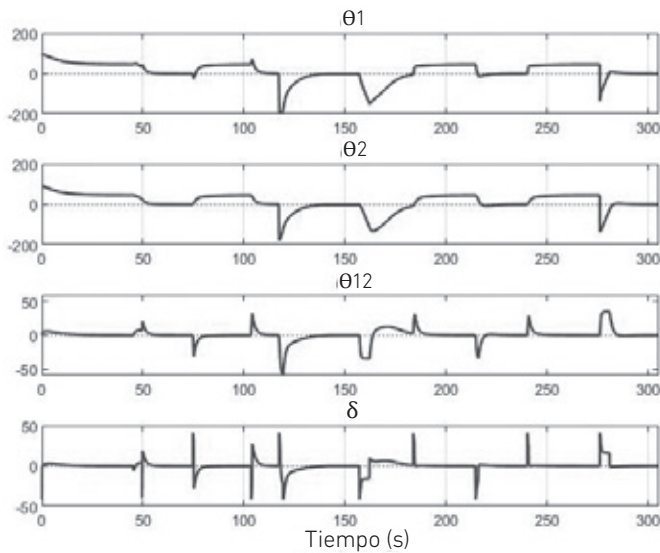


Figura 29
Variables del robot tipo tráiler durante el recorrido





Las pruebas demuestran que es viable realizar la validación del sistema autónomo utilizando robots tipo tráiler, de tal manera que cumpla con el trabajo básico de llevar a cabo el proceso de transporte y estacionamiento para carga o descarga, así como de desplazamiento en avance y retroceso, al igual que si fuera conducido por un ser humano. Esto se debe a que, utilizando el control para seguimiento de trayectoria, se guía al robot móvil por cualquier tipo de ruta que sea definida como función matemática y que normalmente suelen ser rutas rectas, circulares, sinusoidales o una combinación de estas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se logra diseñar de manera satisfactoria un sistema autónomo para el control y seguimiento de trayectoria de un robot tipo tráiler basado en un controlador lineal y redes neurodifusas.
- Se logra realizar el modelado de un robot móvil tipo tráiler sobre la base de un análisis de movimiento en retroceso en un instante de tiempo, obteniendo así las ecuaciones de modelado del robot.
- Se propone una estrategia para mejorar la autonomía del sistema logístico al integrar un tráiler con cabina conectado a una carga adicional, de tal forma que se pueda realizar un mayor volumen de carga en un viaje.

- Se diseña un control lineal LQR basado en el modelo linealizado del robot móvil, el cual se realiza para puntos de operación cercanos a cero. Esto permite tener un buen control del robot móvil y llevarlo a sus valores deseados.
- El controlador basado en una red neurodifusa es una técnica de control que utiliza las funciones de pertenencia definidas en la lógica difusa, pero realizando su conversión a redes neuronales con similitud en las funciones matemáticas (sigmoideas o gaussianas), lo que permite generar un controlador más robusto y práctico de implementar, ya que se basa en la secuencia de proceso: (1) control lineal, (2) lógica difusa y (3) red neurodifusa.
- Se integra la lógica difusa aplicada a la variable de posición y , de tal manera que, pese a haberse diseñado el controlador lineal para un punto de operación, el sistema sea capaz de trabajar correctamente para mayores rangos de la variable de posición, gracias a que se definieron particiones por sectores de trabajo de la variable de posición y se asignó a cada partición las ganancias del controlador adecuadas para un buen funcionamiento.
- Se realiza la validación del sistema de control tanto para retroceso como para avance, demostrando que el tráiler tiene un adecuado comportamiento de seguimiento de trayectoria con un desplazamiento de avance a su destino, lo que le permite hacer un movimiento en diferentes direcciones de acuerdo con el lugar y tipo de aplicación.
- Se demuestra, en una simulación, que la implementación del sistema autónomo utilizando el robot móvil tipo tráiler es factible de ser aplicado en el ámbito industrial en el área de carga/descarga, pues se logra un proceso preciso y automático.

Recomendaciones

- Fabricar un prototipo de tráiler autónomo con la finalidad de interesar a la comunidad empresarial y lograr su masificación industrial. Para ello, deberá contener sensores de ultrasonido de corto y largo alcance ubicados en la zona lateral, delantera y posterior del vehículo, así como cámaras para el monitoreo remoto. Se deberá instalar el controlador a fin de emitir las señales para modificar la velocidad y variar el ángulo del timón del tráiler autónomo.
- Diseñar el sistema de control que integra un controlador lineal y redes neurodifusas, aplicado a un tráiler con N cuerpos, incrementando los criterios en cada controlador de acuerdo con la cantidad de cuerpos del tráiler. Una aplicación de este sistema sería en los vagones de carga/descarga de equipajes en los aviones.
- Realizar nuevas investigaciones para evaluación en otros escenarios como pendientes pronunciadas y terrenos agrestes.

- Realizar investigaciones para el uso de tráileres autónomos en la exploración de otros planetas, teniendo en cuenta diferentes características adicionales, como tipo de suelo de rodadura, señales de control de posicionamiento, sensores de corto y largo alcance, etcétera.

REFERENCIAS

- Ai, R. J. C. T., & Dadios, E. P. (2019, 29 de noviembre - 2 de diciembre). *Neuro-fuzzy mobile robot navigation* [Presentación de paper]. 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666348>
- Aissa, B. C., & Fatima, C. (2015, 13-15 de diciembre). *Adaptive neuro-fuzzy control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot* [Presentación de paper]. 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416699>
- Alsharkawi, A., Al-Feyani, M., Ijaabo, E. M., & Khasawneh, H. (2020, 7-8 de octubre). *Adaptive neuro-fuzzy inference system for a three-wheeled omnidirectional mobile robot* [Presentación de paper]. 2020 3rd International Conference on Applied Engineering (ICAE). <https://doi.org/10.1109/ICAE50557.2020.9350379>
- Béjar, E., & Morán, A. (2019, 5-8 de mayo). *A preview neuro-fuzzy controller based on deep reinforcement learning for backing up a truck-trailer vehicle* [Presentación de paper]. 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE). <https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861534>
- Borole, B. P., Jadhav, S. P., & Waje, P. (2016, 25-27 de noviembre). *Design and implementation of fuzzy and neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation* [Presentación de paper]. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON). <http://dx.doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077359>
- Cheng, J., Zhang, Y., & Wang, Z. (2015a, 23-25 de mayo). *A direct Lyapunov approach for tracking control of mobile robot with two on-axle hitching trailers* [Presentación de paper]. The 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). <https://doi.org/10.1109/CCDC.2015.7162515>
- Cheng, J., Zhang, Y., & Wang, Z. (2015b, 6-9 de diciembre). *Orientation tracking control of mobile robot with three trailers* [Presentación de paper]. Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Design Automation Conference. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2015.7162515>

- Do, C. H., Lin, H. Y., & Huang, Y. C. (2017, 11-14 de diciembre). *Simultaneous localization and mapping with neuro-fuzzy assisted extended kalman filtering* [Presentación de paper]. 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. <https://doi.org/10.1109/SII.2017.8279244>
- Do, Q. H., & Chen, J. F. (2013). A neuro-fuzzy approach in the classification of students' academic performance. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2013, Artículo 179097. <https://doi.org/10.1155/2013/179097>
- Elhassan, A. (2015). *Autonomous driving system for reversing an articulated vehicle* [Tesis de maestría, The Royal Institute of Technology]. https://www.kth.se/polopoly_fs/1.602293.1600689194!/AmroThesis.pdf
- Evestedt, N., Ljungqvist, O., & Axehill, D. (2016, 19-22 de junio). *Path tracking and stabilization for a reversing general 2-trailer configuration using a cascaded control approach* [Presentación de paper]. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535535>
- Gupta, R. K., & Chauhan, S. (2015, 10-12 de diciembre). *Comparision of PID controller & adaptive neuro fuzzy controller for robot manipulator* [Presentación de paper]. 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). <https://doi.org/10.1109/ICCIC.2015.7435761>
- Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H., & Saeys, W. (2015). Learning in centralized nonlinear model predictive control: Application to an autonomous tractor-trailer system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(1), 197-205. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2321514>
- Kolb, J. K., Nitzsche, G., & Wagner, S. (2019). A simple yet efficient path tracking controller for autonomous trucks. *Documentos IFAC en Línea*, 52(8), 307-312. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.088>
- Kural, K., Hatzidimitris, P., Van de Wouw, N., Besselink, I., & Nijmeijer, H. (2017). Active trailer steering control for high capacity vehicle combinations. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2(4), 251-265. <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2767281>
- Leng, Z., & Minor, M. A. (2017). Curvature-based ground vehicle control of trailer path following considering sideslip and limited steering actuation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 332-348. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2572208>
- Li, B., Wang, K., & Shao, Z. (2017, 28 de septiembre - 2 de octubre). *Time-optimal trajectory planning for tractor-trailer vehicles via simultaneous dynamic optimization* [Presentación de paper]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353917>

- Liao, Y., Ou, Y., & Meng, S. (2017, 28-30 de mayo). *Wheeled mobile robot based on adaptive linear quadratic Gaussian control* [Presentación de paper]. 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). <https://www.aminer.cn/pub/5c756feff56def97986a5725>
- Lin, Y. C., Nguyen, H. L. T., & Wang, C. H. (2017, 16-18 de mayo). *Adaptive neuro-fuzzy predictive control for design of adaptive cruise control system* [Presentación de paper]. 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2017.8000187>
- Ljungqvist, O., Axehill, D., & Helmersson, A. (2016, 12-14 de diciembre). *Path following control for a reversing general 2-trailer system* [Presentación de paper]. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, Estados Unidos. <https://doi.org/10.1109/CDC.2016.7798630>
- Lu, J., & Kintak, U. (2017, 9-12 de julio). *Mobile robot navigation based on adaptive neuro-fuzzy inference system with virtual target strategy* [Presentación de paper]. 2017 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR). <https://doi.org/10.1109/ICWAPR.2017.8076677>
- Mattar, E., AlMutib, K., AlSulaiman, M., & Ramdane, H. (2017, 8-11 de mayo). *Mobile robot neuro-fuzzy navigation based VSLAM features learning* [Presentación de paper]. 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE). <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2017.8447975>
- Medina Medina, W. (2018). Modelamiento y control de un sistema de tráiler autónomo. *Ingeniería Industrial*, 36, 257-284. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2018.n036.2457>
- Michatek, M. M. (2017). Cascade-like modular tracking controller for non-standard N-trailers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2), 619-627. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2557232>
- Nawrocka, A., Nawrocki, M., & Andrzej, K. (2017, 28-31 de mayo). *Advanced control algorithms for mobile robot* [Presentación de paper]. 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC). <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2017.7970435>
- Poornapushpakala, S. (2015, 19-20 de mayo). *Simulation of neuro-fuzzy controller for a flow process using MATLAB* [Presentación de paper]. 2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT-2015). <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2015.7159336>
- Prasad, A., Sharma, B., & Vanualailai, J. (2016, 5-6 de diciembre). *A geometric approach to motion control of a standard tractor-trailer robot* [Presentación de paper]. 2016 3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE). <https://doi.org/10.1109/APWC-on-CSE.2016.020>

- Rigatos, G., Siano, P., Wira, P., Busawon, K., & Binns, R. (2017, 10-12 de julio). *Nonlinear optimal control for autonomous navigation of a truck and trailer system* [Presentación de paper]. 2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). <https://doi.org/10.1109/ICAR.2017.8023657>
- Ritzen, P., Roebroek, E., Van de Wouw, N., Jiang, Z. P., & Nijmeijer, H. (2016). Trailer steering control of a tractor-trailer robot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(4), 1240-1252. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2499699>
- Sanders, D. A. (2018). Non-model-based control of a wheeled vehicle pulling two trailers to provide early powered mobility and driving experiences. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(19), 96-104. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2726443>
- Tan, P., & Cai, Z. (2015, 12-14 de diciembre). *Modelling and planning of mobile robot navigation control in unknown environment* [Presentación de paper]. 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). <https://doi.org/10.1109/CICN.2015.292>
- Van Hau, P., Nam, D. P., Ha, N. T., Thanh, P. T., Hai, H. T., & Hanh, H. D. (2017, 21-23 de julio). *Asymptotic stability of the whole tractor-trailer control system* [Presentación de paper]. 2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2017.8030910>
- Wu, T., & Hung, J. Y. (2017a, 19-21 de junio). *Lateral position control for a tractor-trailer system using steering rate input* [Presentación de paper]. 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001297>
- Wu, T., & Hung, J. Y. (2017b, 30 de marzo - 2 de abril). *Lateral position control for a tractor-trailer system using coordinate transformation and hybrid controllers* [Presentación de paper]. SoutheastCon, 2017. <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925281>
- Wu, T., & Hung, J. Y. (2017c, 30 de marzo - 2 de abril). *Path following for a tractor-trailer system using model predictive control* [Presentación de paper]. SoutheastCon, 2017. <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925337>
- Yuan, J., Sun, F., & Huang, Y. (2015). Trajectory generation and tracking control for double-steering tractor-trailer mobile robots with on-axle hitching. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), 7665-7677. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2455016>
- Yue, M., Hou, X., & Yang, L. (2017, 26-28 de julio). *An efficient trajectory tracking control for tractor-trailer vehicle system* [Presentación de paper]. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8027399>

Zheltoukhov, A. A., & Stankevich, L. A. (2017). *A survey of control architectures for autonomous mobile robots* [Presentación de paper]. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910746>

