



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

**Versão do arquivo anexado / Version of attached file:**

Versão do Editor / Published Version

**Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:**

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/8287>

**DOI: 10.22517/23447214.8287**

**Direitos autorais / Publisher's copyright statement:**

© by Universidad Tecnológica de Pereira. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

# Planeación y Seguimiento de Trayectorias de un Vehículo Terrestre con Base en el Control de Dirección en un Ambiente Real

Planning and tracking trajectories of land vehicles based on the direction control in a real environment

Ruben Darío Hernandez Beleño<sup>1</sup>, Giovani Bernardes Vitor<sup>2</sup>, Janito Vaqueiro Ferreira<sup>3</sup>, Pablo Siqueira Meirelles<sup>3</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>*Departamento de Mecánica Computacional, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-São Paulo, Brasil.*

ruben@fem.unicamp.br  
giovani@fem.unicamp.br  
janito@fem.unicamp.br  
pablo@fem.unicamp.br

**Resumen**— Este artículo presenta un algoritmo de control de dirección para la planeación y seguimiento de trayectorias de un vehículo autónomo terrestre en escala (AGV), permitiéndole tener un comportamiento confiable para aplicaciones en ambientes reales. El planeamiento de trayectorias construye el camino, considerándolo libre de obstáculos y aplicable desde el estudio cinemático, en donde el controlador, determina la actuación del ángulo de dirección en búsqueda de minimizar los errores de orientación y localización del vehículo, con respecto a su desplazamiento desde un punto inicial hasta un punto final de la ruta planeada.

**Palabras clave** — Control de dirección, navegación de robots móviles, planeación de trayectorias, sistemas embarcados.

**Abstract** — This paper presents a direction control algorithm, used on path planning and tracking of a scale automated guided vehicle (AGV), giving it a reliable behaviour on real environments. The path planner builds a path free of obstacles, which is applicable from the kinematics study point-of-view, where, the controller set the direction angle, in order to minimize the orientation and localization regarding its displacement from a start point to an end point on the route planned.

**Key Word** — Direction control, mobile robot navigation, path planning, navigation sensory systems, embedded systems.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, áreas de investigación en robótica móvil, se encuentran en continua evolución debido a los avances de los sistemas electrónicos y computacionales, permitiendo generar nuevas áreas de interés en estudios sobre el control de vehículos terrestres autónomos, con el

objetivo de dotarlos con capacidades de raciocinio inteligente para que puedan interactuar en el medio en que se encuentren [1]. Su principal énfasis se basa en los problemas de operación conocidos como desplazamiento, que involucran los parámetros de reconocimiento y planeación de rutas en ambientes complejos no estructurados.

De forma que los vehículos robóticos terrestres se distinguen principalmente por sus aspectos de configuración de tracción, dirección y grado de actuación, estos pueden ser sub actuados hasta completamente no-holonómicos, es decir, que tiene menos grados de libertad controlables. De acuerdo con estos parámetros, los sistemas de control son proyectados satisfaciendo sus características físicas y mecánicas [2]. Sin embargo, el control de vehículos con ruedas presenta dificultades debido a las restricciones no holonómicas propias del modelo cinemático y a demás de la saturación de los actuadores. Algunas soluciones a este problema son abordados en [3] y [4]. En el primero de ellos, la velocidad de referencia del robot no puede ser cero, por tanto no puede realizar tareas de posicionamiento. En [3], se obtiene una ley de control estable, otros enfoques similares a este tipo de sistemas, se logran con controladores difusos [4]. El problema de estabilización de posición, significa posicionar el vehículo en el destino final, comenzando en cualquier punto con referencia a la trayectoria, teniendo en cuenta la localización como la orientación con respecto al sistema de coordenadas global.

Este artículo tiene como contexto la implementación de un controlador para el seguimiento de trayectorias de un vehículo autónomo en escala (AVG) a bajas velocidades. Partiendo del estudio del modelo cinemático y adaptando la técnica de control de dirección, con el objetivo de minimizar el error de orientación y posición del vehículo, los modelos matemáticos y las rutinas de control fueron simulados y validados en Matlab/Simulink,

posteriormente fue implementado en un vehículo en escala con la misma trayectoria proyectada.

Seguido de esta sección de introducción, el artículo está dividido de la siguiente manera: La sección 2 presenta la estructura mecánica adoptada, en la sección 3 es muestra el modelo matemático del vehículo, en la sección 4 se enseña el planeamiento de trayectoria propuesto, en la sección 5 se aborda la estrategia para el control. Demostrado los resultados de validación y simulación en la sección 6; finalmente, en la sección 7 se concluye el desarrollo propuesto, seguido la relación de la bibliografía presentada.

## II. ESTRUCTURA MECÁNICA

El vehículo desarrollado fue diseñado con dos módulos, remoto y local, como se muestra en la figura 1.

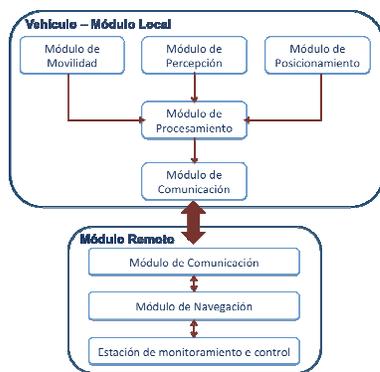


Figura 1. Representación de los módulos de la estructura del vehículo.

La base estructural fue pensada en una plataforma en escala reducida y con características aproximadas a las de un vehículo comercial, en el cual se tenga la capacidad de adaptar la estructura electrónica y tecnológica para hacerlo autónomo. Dados estos requerimientos, se adoptó el carro en escala Tamiya Mismo R34 GTR Z-Tune - XB 1/10, el cual es un sistema radio controlado para competencias profesionales de vehículos en escala reducida con características cinemáticas y dinámicas similares a los modelos reales, Figura 2.

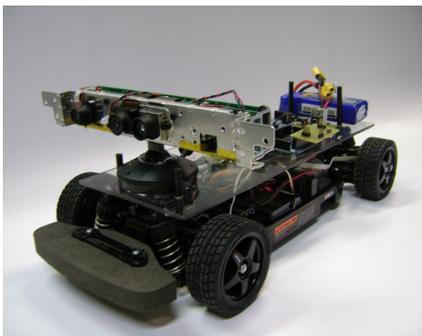


Figura 2. Vehículo Terrestre en escala Tamiya.

La elección de este prototipo se debe a que es una plataforma ya lista con una estructura mecánica completa para su uso. Este vehículo tiene la característica de tener un sistema diferencial de tracción en las cuatro ruedas y un sistema de dirección en las ruedas delanteras cuya configuración es tipo Ackerman.

### A. Sistema Diferencial

El sistema diferencial es un dispositivo mecánico que tiene la función de dividir el torque entre dos semiejes, produciendo una compensación entre estos cuando uno de ellos sufre una pérdida en la rotación.

En caso de moverse en línea recta, las dos ruedas recorren la misma distancia a la misma velocidad permitiendo un mayor torque y capacidad de transitar por superficies relativamente irregulares.

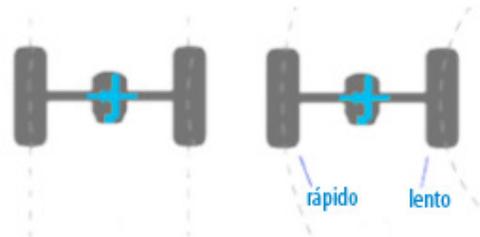
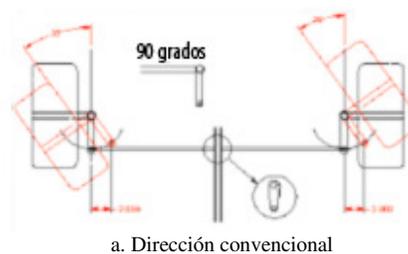


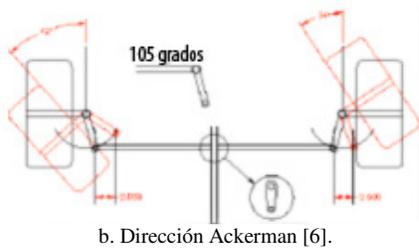
Figura 3. Movimientos diferenciales de las ruedas.

### B. Sistema de Dirección

El sistema de dirección del vehículo tiene como base el modelo Ackerman, a través de la geometría de este modelo las ruedas delanteras giran con ángulos diferentes. La figura 4 presenta un boceto de dos tipos de sistemas, el primero de ellos (Figura 4a) muestra un esquema con el brazo del eje en un ángulo de 90 grados y el otro esquema (Figura 4b), siguiendo el modelo Ackerman, con el brazo del eje con un ángulo de 105 grados. El modelo de 90 grados hace que las dos ruedas delanteras giren paralelamente con un mismo ángulo y su principal desventaja es la pérdida de desempeño y deslizamiento en el momento de la curva. Caso contrario en el modelo de Ackerman, que garantiza que el ángulo de dirección de las ruedas delanteras sean diferentes en el momento de realizar la curva como se muestra en la figura 4b.



a. Dirección convencional



b. Dirección Ackerman [6].

Figura 4. Configuración del sistema de dirección

### III. MODELO MATEMÁTICO DEL VEHÍCULO

El modelo matemático es usado para describir las propiedades físicas del movimiento de los robots móviles desplazados por ruedas, representando su localización y orientación, sin considerar las fuerzas que afectan su movimiento. Algunos modelos matemáticos han sido abordados en la literatura y son representados por las ecuaciones de movimiento las cuales están basadas en relaciones geométricas que rigen el sistema [6] y [7]. Un tema de investigación consiste en que las ruedas del robot giren sin resbalar sobre la superficie de trabajo. Aunque dicha investigación es bastante interesante, algunos autores han desarrollado modelos matemáticos más complejos que influyen en el fenómeno de deslizamiento [8], este último punto de vista no será considerado en el presente trabajo.

Inicialmente se considera que el vehículo está inserido en un ambiente bidimensional a su movimiento [9], por tanto, es representado en el plano horizontal, es decir, en los ejes X y Y respectivamente, como se presenta en la figura 5. Para la descripción del movimiento del vehículo es considerado un sistema de coordenadas globales XY que representan la localización del centro de gravedad, igualmente  $\psi$  describe el ángulo de orientación del vehículo [10].

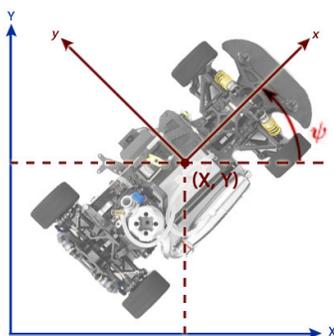


Figura 5. Representación de la posición del vehículo.

#### A. Modelo cinemático

El modelo cinemático generalmente adoptado para modelar un vehículo terrestre es el modelo de Ackerman, descrito en [6] y [7], representado por un sistema rectangular soportado por cuatro ruedas como se representa en la figura 5. Las ruedas traseras poseen un eje fijo y las ruedas

delanteras pueden ser accionadas a través del giro de la barra de dirección [11]. El modelo cinemático, reúne las características de no linealidad y no holonomicidad, permitiendo proyectar el controlador de dirección para el seguimiento de trayectorias abordado en la sección 5.

#### 1. Modelo cinemático “Bicicleta”

El modelo de Ackerman usado para el análisis cinemático del vehículo puede ser simplificado para el modelo bicicleta reduciendo su análisis matemático. Este modelo consiste en que las dos ruedas delanteras son representadas por una única rueda en el punto A y las dos ruedas traseras son representadas por una única rueda trasera en el punto B, los ángulos de dirección de las ruedas delanteras son representados por un único ángulo  $\delta$ . El centro de gravedad del vehículo es considerado en el punto C, la distancia de los puntos A y B al centro de gravedad del vehículo son dados por  $l_f$  y  $l_r$  respectivamente y la distancia entre ejes del vehículo es dado por  $L = l_f + l_r$ .

La velocidad en el centro de gravedad del vehículo es denotada por V y genera un ángulo  $\beta$  con el eje longitudinal del vehículo. Este ángulo  $\beta$  es conocido como el ángulo de deslizamiento. Existe aún otro ángulo conocido como ángulo de patinaje en una rueda, que es definido como la diferencia entre el ángulo de dirección de apuntamiento de la rueda y la dirección real en que la rueda se está dislocando  $\beta - \delta$ , es decir, el vector velocidad de apuntamiento de la ruedas en la dirección  $\delta$  no coincide con el vector velocidad de dislocamiento del vehículo en la dirección  $\beta$ , como se representa en la figura 6. Abordajes más detallados son presentados con mayor análisis en [6], [7] y [12].

A partir de este análisis se puede aplicar una simplificación más, en la cual se asume que los vectores velocidad en los puntos A y B se encuentran en la misma dirección de la orientación de las ruedas delanteras y traseras, respectivamente. Por tanto, el ángulo de patinaje  $\beta - \delta$  es nulo, esta suposición es aplicada en modelos cinemáticos a velocidades bajas, permitiendo que la fuerza lateral generada sobre las ruedas sea pequeña y pueda ser considerada despreciable [6], [7] y [13]. Como consecuencia, se puede concluir que como  $\beta - \delta = 0$  y que el ángulo de deslizamiento  $\beta$  será igual al ángulo de dirección  $\delta$  del vehículo como se muestra en la representación de la figura 6.

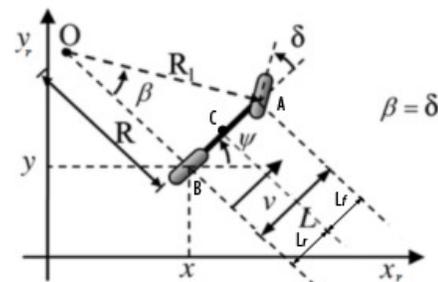


Figura 6. Modelo cinemático simplificado tipo Bicicleta.

De esta forma las ecuaciones cinemáticas pueden ser expresadas por:

$$\dot{X} = V \cdot \cos(\psi) \quad (1)$$

$$\dot{Y} = V \cdot \sin(\psi) \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = \frac{V}{L} \tan(\delta) \quad (3)$$

## 2. Modelo cinemático de rastreo del vehículo

El modelo cinemático de rastreo consiste en definir inicialmente la configuración mecánica del vehículo, los respectivos parámetros y el punto de referencia escogido para la definición de los errores de rastreo conforme lo mostrado en la figura 8. El parámetro  $e(t)$  corresponde al error de posicionamiento del vehículo a lo largo del tiempo. Los parámetros  $\psi_c(t)$  y  $\psi_e(t)$  corresponden al ángulo de orientación del camino proyectado en relación al referencial y al ángulo formado por la diferencia del ángulo de orientación del vehículo por ángulo de orientación del camino proyectado respectivamente.

Por tanto el ángulo  $\psi_c(t)$  de la figura 7 equivale al ángulo absoluto formado por la dirección del vehículo con respecto a la recta tangente del punto más cercano del camino. Este ángulo  $\psi_c(t)$  también es conocido como el ángulo de movimiento del vehículo en el plano horizontal, descrito por:

$$\psi_e(t) = \psi(t) - \psi_c(t) \quad (4)$$

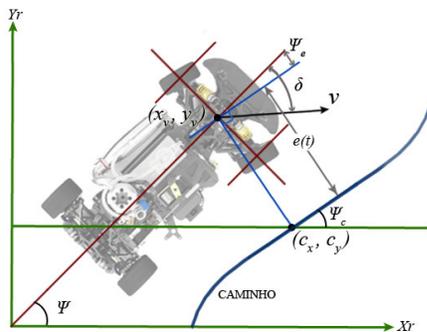


Figura 7. Modelo de las variables de error de posicionamiento y orientación con respecto al camino [10].

## IV. PLANEAMIENTO DE TRAYECTORIA

La trayectoria proyectada para que el vehículo pueda moverse en el ambiente es compuesta por  $n$  puntos dados secuencialmente, teniendo en cuenta su posición y orientación. Se asume que la trayectoria proyectada es punto a punto y es una ruta posible de ser realizada por el vehículo, es decir, no se tiene la previsión de aparecer nuevos obstáculos en el camino. De manera que la trayectoria se define como el trayecto generado por el conjunto de rectas formadas, a partir de la unión de coordenadas secuenciales de posición y orientación

previamente determinadas por donde se desea que el vehículo realice el trayecto.

Por otra parte, el conjunto formado por la secuencia de coordenadas es definido como camino, cada una de las estrellas y circunferencias representan las coordenadas inseridas como se muestra en la figura 8. La unión de dos coordenadas secuenciales forma una recta la cual es definida como trecho denotado como T1, T2... TN, el conjunto de trechos componen el camino, lo que define la trayectoria planeada, permitiendo así validar el modelo cinemático y obtener el comportamiento del vehículo real.

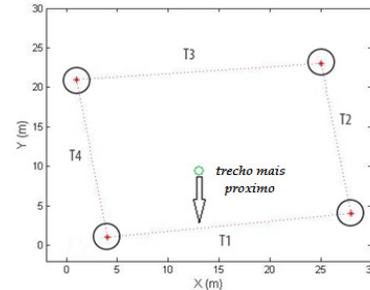


Figura 8. Planeamiento de trayectoria definida punto a punto con localización del vehículo.

El seguimiento del vehículo con respecto a la trayectoria es basado en la detección del trecho de referencia correspondiente al segmento de la trayectoria que es utilizado para ser rastreado. El trecho de referencia más próximo al vehículo es procurado en el sentido de la coordenada final, siendo esta referencia determinada por las coordenadas de posición del vehículo como se presenta en la figura 10. Permitiendo que el vehículo recorra la trayectoria proyectada desde el trecho más próximo hasta al coordenada final ejecutando el seguimiento total de la trayectoria planeada. Por tanto, el método utilizado para la búsqueda de referencia más cercana requiere la minimización de una función de error de posición que dependerá del modelo cinemático de movimiento del vehículo.

## V. ESTRATEGIA DE CONTROL

El controlador adaptado para el desarrollo de este proyecto es basado en el controlador proyectado en [7] y [10], teniendo en cuenta que la principal característica de operación de la plataforma es definida para moverse en bajas velocidades y considerando que el movimiento del vehículo es descrito por el modelo cinemático. Este controlador posee una ley intuitiva de control debido al movimiento de las ruedas delanteras a un punto de la trayectoria definida como se muestra en la figura 7. La ley de control implementada se basada en dos tipos de errores que pueden ocurrir, responsables por corregir el alineamiento de las ruedas por el ajuste del ángulo de dirección  $\delta$ , el error de orientación ocurre cuando la orientación del vehículo no coincide con la orientación de la trayectoria, por tanto, el primer término de la ley de control es igual al error de orientación  $\psi_e(t)$  dado por la ecuación 4; el error de localización ocurre cuando la posición del vehículo  $(X_V, Y_V)$  no coincide con la posición de la trayectoria  $(C_x, C_y)$ , por tanto, la segunda variable de la ley de

control es basado en el error transversal  $e(t)$ , siendo este término determinado por el análisis del comportamiento del vehículo al interceptar la tangente de la trayectoria en el punto  $(C_x, C_y)$  como se presenta en la figura 9.

De acuerdo con la figura 11, se determina que:

$$\alpha(t) = v_y t \quad (5)$$

Obteniendo las componentes de velocidad en los ejes,

$$v_y = v \cos(\delta) \quad (6)$$

$$v_x = v \sin(\delta) \quad (7)$$

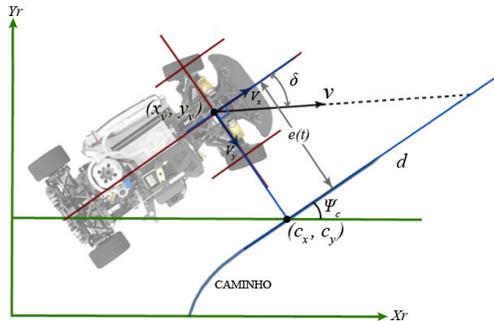


Figura 9. Análisis del error de orientación y localización.

Aún de la figura 11 tenemos que,

$$d = v_x t \quad (8)$$

Usando las ecuaciones 5, 7 y 8 tenemos,

$$d = \frac{\alpha(t)}{\tan(\delta)} \quad (9)$$

Donde, el ángulo  $\delta$  es dado por las ecuaciones 8 y 9 obteniendo,

$$\delta = \text{atan} \frac{\alpha(t)}{v_x t} \quad (10)$$

A partir de la ecuación 10 se determina el cálculo del error de localización que corregirá el ángulo de dirección  $\delta$  de forma que la trayectoria impuesta interceptará la tangente da trayectoria del punto  $(C_x, C_y)$  a  $V_x/k$  unidades de complemento.

$$\delta = \text{atan} \frac{k\alpha(t)}{v_x} \quad (11)$$

Por tanto, la ley de control de dirección  $\delta(t)$  resultante es representada por la ecuación:

$$\delta(t) = \psi_e(t) + \text{atan} \frac{k\alpha(t)}{v_x(t)} \quad (12)$$

Donde el parámetro  $k_1$  es el parámetro de ganancia proporcional en el tiempo y el parámetro  $v(t)$  corresponde a la velocidad del vehículo en la dirección del eje delantero.

Según lo expresado en [14], para mejorar el comportamiento de este tipo de controladores a bajas velocidades se debe adicionar una ganancia  $k_2$  en la función del error de localización buscando suavizar la variable de dirección, de esta forma la ley de control descrita puede ser expresada de la siguiente manera.

$$\delta(t) = \psi_e(t) + \text{atan} \left( \frac{k_1 \alpha(t)}{v_x(t) + k_2} \right) \quad (13)$$

Debido a que el vehículo tiene una restricción en la variación de la tasa de dirección se considera que:

$$-\delta_{\text{máx}} < \delta < \delta_{\text{máx}} \quad (14)$$

Considerando la ecuación 12 y la restricción impuesta por la ecuación 14, la ley de control resultante puede ser descrita como:

$$\delta(t) = \begin{cases} \psi_e(t) + \text{atan} \left( \frac{k_1 \alpha(t)}{v_x(t) + k_2} \right) & \text{se } \left| \psi_e(t) + \text{atan} \left( \frac{k_1 \alpha(t)}{v_x(t) + k_2} \right) \right| < \delta_{\text{máx}} \\ \delta_{\text{máx}} & \text{se } \left| \psi_e(t) + \text{atan} \left( \frac{k_1 \alpha(t)}{v_x(t) + k_2} \right) \right| \geq \delta_{\text{máx}} \\ -\delta_{\text{máx}} & \text{se } \left| \psi_e(t) + \text{atan} \left( \frac{k_1 \alpha(t)}{v_x(t) + k_2} \right) \right| \leq -\delta_{\text{máx}} \end{cases} \quad (15)$$

## VI. RESULTADOS

En la figura 10 se puede apreciar el recorrido del vehículo sobre la trayectoria proyectada en su totalidad, las ganancias del controlador son de  $k_1=8$  y  $k_2=4$ , estas ganancias fueron obtenidas de acuerdo a las respuestas obtenidas en la simulación. En la figura 11 se observa la respuesta del controlador sobre el ángulo de dirección, donde la variación de los errores de orientación y localización en el momento da cambiar el trecho de referencia y el ángulo de orientación del vehículo en relación de la trayectoria son minimizados.

De igual forma fueron buscadas las respuestas para diferentes localizaciones del vehículo en relación a la trayectoria proyectada como se presenta en la figura 12, de igual forma fueron realizadas validaciones sobre cada trecho de referencia variando la orientación y localización del vehículo obteniendo una precisión en el controlador para satisfacer la coordenada de llegada final.

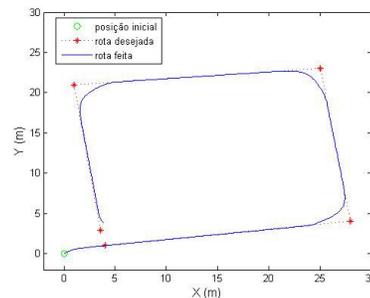


Figura 10. Respuesta del vehículo para el seguimiento de la trayectoria.

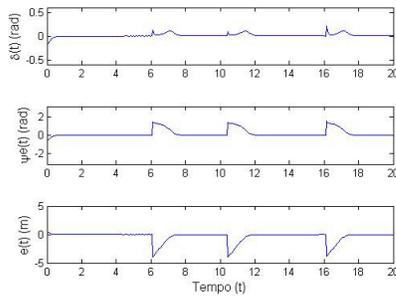


Figura 11. Respuesta del controlador y representación de los errores.

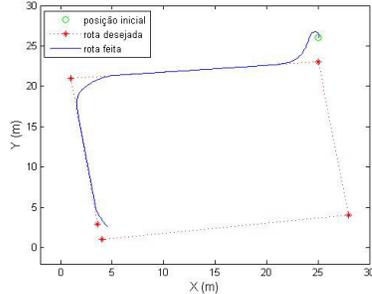


Figura 12. Respuesta del vehículo con relación al punto final.

## VII. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra el desarrollo de un vehículo terrestre en escala con la capacidad de navegar autónomamente hasta un punto de coordenadas conocidas. El objetivo fue alcanzado por medio de las alteraciones en el vehículo, donde se adaptaron sistemas de automatización, teniendo la capacidad de supervisión y monitoramiento de la plataforma.

Una parte importante durante el desarrollo del trabajo se basó en la validación de los modelos matemáticos del vehículo como del controlador de dirección los cuales fueron aplicados en la plataforma real, generando el conocimiento de lo que se podía esperar del comportamiento del vehículo en un ambiente real.

El control de dirección adaptado en el vehículo terrestre en escala, presentó un comportamiento razonable en la búsqueda del seguimiento de la trayectoria propuesta. Sin embargo, en las pruebas reales se presentaron variables que no se tenían contempladas en la simulación como los errores de los sensores de orientación y posición. Por tanto, fue necesario desarrollar aplicaciones adicionales en busca de obtener un comportamiento óptimo del sistema.

## REFERENCIAS

[1] Bekey, G. A. "Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control". MIT Press, Cambridge, UK, 2005.  
 [2] Morin, P. and Samson, C. "Motion control of wheeled mobile robots". Chapter 34 of "Handbook of Robotics", Springer Verlag, 2008.

[3] Doh-hyum Kim, Jum-Ho Oh, (1998). "Globally Asymptotically Stable Tracking Control of Mobile Robots". Int. Conf. on Control Application IEEE pp. 1297-1301.  
 [4] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, Noguchi T. "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot". Int. Conf. on Robotics and Automation. pp 384-389.  
 [5] Bento Luis Conde, Urbano Munest, Abel Mendes, Michael Parent (2003). "Path tracking Controller of a Bi-steerable Cybernetic Car using Fuzzy Logic". Int. Conf. on Advance Robotics ICAR 2003 pp 1556-1561.  
 [6] Rajamani, R. (2006). "Vehicle Dynamics and Control". [S.l.]: Springer, 2006.  
 [7] Snider J. M. (2009). "Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking". Robotics Institute Carnegie Mellon University CMU-RI-TR-09-08.  
 [8] Balakrishna R., and A. Ghosal, "Modelling of Slip for Wheeled Mobile Robots", IEEE transaction on robotics and automation", vol. 11, No. 1, 1995, pp. 126-132.  
 [9] Lenain, R. (2005). "Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement". Phd Thesis, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand, France, 2005.  
 [10] Hoffman, G., Tomlin, C., Montemerlo, M., and Thrun, S. (2007). "Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing". Proceedings of the 26th American control Conference.  
 [11] Dudek, G. and Jenkin, M. (2000). "Computational Principles of Mobile Robotics". Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.  
 [12] R. Hernández. "Proposta de uma plataforma de testes para o desenvolvimento de veículos autônomos", M. Sc. Dissertação, Faculdade de Engenharia Mecânica, Univ. Estadual de Campinas, 2012.  
 [13] De Paiva, E.C., Azinheira, J.R., Bueno, S.S. (2010). "Controle de trajetoria para veiculos terrestres de exterior". XI Congresso Brasileiro de Automatica. Bonito, MS, Brasil, Setembro 2010.  
 [14] Rojo et. Al., (2007). "Spirit of berlin: An autonomous car for the darpa urban challenge – hardware and software architecture" Proceedings of the 27th American control conference.