Navegación Autónoma Bio-Inspirada para Robots Móviles Diferenciales

L. F. Vázquez-Chávez * **A. Rodríguez-Angeles** *

* *CINVESTAV IPN*
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Mecatrónica
Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco
Ciudad de México, C.P. 07360.
(e-mail: fernando.vazquez@cinvestav.mx, aangeles@cinvestav.mx).

Resumen: En el presente trabajo se consideran algunas características generales observadas en el comportamiento de diversos agentes biológicos, particularmente aquellas que provocan desplazamientos de un punto inicial a otro final con una orientación deseada, evadiendo colisiones contra obstáculos estáticos y dinámicos. Basado en lo anterior, se propone un sistema de control de navegación que integre fuerzas de atracción que provocan que el individuo se dirija hacia una posición determinada, así como fuerzas de repulsión que le permitan evitar colisiones. El modelo de fuerzas considerado es extendido para su aplicación al modelo cinemático de un robot móvil diferencial, esto mediante la interconexión de un lazo externo de control que genera señales de velocidad traslacional y un lazo interno de control que proporciona la velocidad angular requerida para obtener la orientación del móvil. Mediante el método de Lyapunov se demuestra la estabilidad del lazo cerrado entre el control de navegación y el modelo cinemático del robot para el caso libre de colisiones. Resultados de simulación y experimentales soportan las conclusiones sobre la estabilidad y convergencia del sistema de navegación propuesto.

Palabras Clave: Control de navegación, Robot móvil autónomo, Control Bio-inspirado.

1. INTRODUCCIÓN

Un robot móvil terrestre es un dispositivo electromecánico que puede desplazarse sobre un espacio de trabajo, en este caso de dos dimensiones, que puede vincularse con un plano cartesiano haciendo simple su localización. Para este trabajo se considera un robot propulsado por ruedas que posee dos grados de movilidad y ninguno de direccionabilidad (robot móvil tipo (2,0)), también llamado de tracción diferencial. Un objetivo de interés en la robótica móvil es brindar autonomía al sistema, lo cual requiere la resolución de dos situaciones importantes que son navegación o posicionamiento a partir de una condición inicial dada y la evasión de obstáculos durante dicha trayectoria. Existen diferentes métodos para abordar y resolver estas situaciones. En el enfoque aquí propuesto, se induce al robot un control basado en reglas de comportamiento observadas en la dinámica de individuos en multitudes, que aunque aparentemente son comportamientos complejos, en condiciones "normales" pueden encontrarse algunos patrones, por ejemplo, para ir de un punto a otro, no suelen tomarse decisiones complicadas entre diferentes alternativas, sino que se aplican estrategias que se han aprendido a través del tiempo, por esto es que se reacciona a obstáculos u otros individuos de forma casi automática y su desempeño puede aproximarse aplicando algunas nociones generales de la física clásica, Helbing et al. (2001); Vicsek et al. (1995).

⋆ Trabajo parcialmente auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT-México, por el proyecto 254329.

Los avances en investigación de la dinámica de multitudes han sido relevantes para comprender la manera en que se desempeña un individuo en su entorno y que características del mismo lo hacen tomar una determinada acción, particularmente una dirección o movimiento, esto se basa en diversas observaciones que generalizan el comportamiento, Helbing et al. (2000, 2001, 2005), entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- Los individuos muestran aversión a tomar desviaciones o moverse en dirección opuesta a la deseada, en consecuencia tienden a elegir las rutas más rápidas.
- Si hay rutas alternas con la misma distancia que la principal, se preferirá tomar aquella en la que pueda seguir de frente el mayor tiempo posible.
- Se prefiere avanzar a velocidades individuales que corresponden a las más cómodas o que representan menos gasto energético para cada individuo.
- Se prefiere mantener cierta distancia con otros individuos, paredes u obstáculos, esta distancia tiende a descender cuando se tiene más prisa o hay mayor densidad de individuos.
- Generalmente no se revelan las estrategias de comportamiento en cada situación, sino que actúan de forma más o menos automática.

Estas investigaciones sobre movilidad son relevantes para predecir el comportamiento de individuos en diferentes escenarios, como por ejemplo edificios, espacios confinados o al encontrarse con obstáculos en su camino hacia un punto deseado, con lo que es posible hacer mejores diseños de estos espacios con el fin de prevenir situaciones peligrosas.

El planteamiento que se toma como base para este artículo es realizado por Helbing et al. (2000), llamado modelo de fuerzas generalizadas, donde se caracteriza el comportamiento antes mencionado. Este modelo biológico se utiliza para definir un lazo externo de control que proporciona variables de velocidad en direcciones X y Y dentro de un marco de referencia fijo, dichas señales son utilizadas por un lazo interno de control que las procesa y envía como velocidades lineal y angular, necesarias para comandar al robot móvil diferencial.

Este artículo está organizado de la siguiente manera; en el capítulo 2 se presenta el diseño del control de navegación, especificando la manera en que operan los lazos de control externo e interno y la forma en que se programan en la plataforma móvil, el capítulo 3 describe a detalle el análisis de estabilidad del sistema en lazo cerrado, en los capítulos 4 y 5, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación y experimentación, finalmente se presenta la conclusión del trabajo.

2. DISEÑO DEL CONTROL DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

En esta sección se muestra en detalle la interacción de los lazos de control externo e interno con el robot diferencial; en el "control externo" se procesa el modelo de fuerzas generalizadas, Helbing et al. (2000), esto produce valores de aceleración en direcciones X y Y, que al ser integradas producen las señales de referencia v_x y v_y, estas variables alimentan al "control interno" que se encarga de generar los valores de velocidad lineal V y angular W, además de conseguir una orientación deseada utilizando el parámetro predefinido θ_d, lo que hace posible el completo control del robot, lo anterior se observa con claridad en la figura 1.

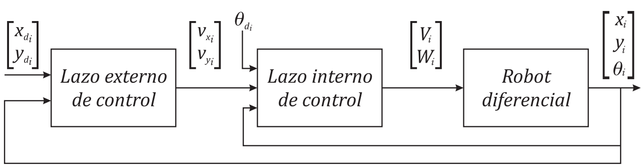

Fig. 1. Estructura del controlador de navegación autónoma

2.1 Modelo cinemático del robot diferencial

Un robot móvil del tipo (2,0), generalmente modelado a nivel cinemático (1), se controla por una combinación de velocidad traslacional V_i y rotacional W_i, como se muestra en la figura 2.

Donde x_i y y_i son las coordenadas del centro de rotación del robot respecto a los ejes del marco de referencia fijo, θ_i representa su orientación.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= V_i cos(\theta_i) \\ \dot{y}_i &= V_i sin(\theta_i) \\ \dot{\theta}_i &= W_i \end{aligned} \tag{1}$$

El índice i, identifica al i-esimo robot dentro de un conjunto de robots móviles.

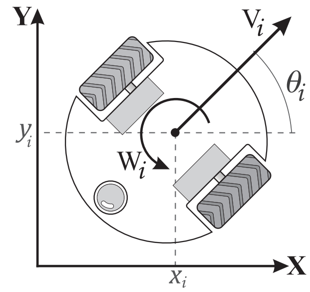

Fig. 2. Robot móvil de tipo (2,0)

2.2 Lazo de control externo

Este bloque de control se encarga de procesar el algoritmo Bio-inspirado, Helbing et al. (2000), y entregar como salida valores para las variables de velocidad v_{x_i} y v_{y_i} mismas que se obtienen al integrar el vector de aceleración que se obtiene directamente del modelo de fuerzas generalizadas.

El modelo asume que una mezcla de fuerzas socio-psicológicas y físicas influyen en el comportamiento de un individuo (2), se considera que éste tiene masa m_i, se desplaza con una velocidad $\boldsymbol{v}_i = [v_{x_i}\ v_{y_i}]$, la cual tiende a adaptarse en un tiempo característico τ_i a una velocidad deseada v_i^0, siguiendo una dirección marcada por el vector $\boldsymbol{e}_i^0$. De forma simultánea, trata de mantener una velocidad dependiente de la distancia hacia otros individuos j y obstáculos o paredes w, lo que puede modelarse por "fuerzas de interacción" $\boldsymbol{f}_{ij}$ y $\boldsymbol{f}_{iw}$ respectivamente, Helbing et al. (2000).

$$m_i \frac{d\boldsymbol{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0 \boldsymbol{e}_i^0 - \boldsymbol{v}_i}{\tau_i} + \sum \boldsymbol{f}_{ij} + \sum \boldsymbol{f}_{iw} \tag{2}$$

Se describe la tendencia psicológica de dos individuos i y j de mantenerse alejados uno del otro mediante una fuerza de interacción repulsiva $A_i exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i]\mathbf{n}_{ij}$, donde A_i y B_i son constantes; $d_{ij} = ||\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j||$ denota la distancia entre sus centros de masa, $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)/d_{ij}$ es un vector normalizado que apunta desde el robot j hacia el i, $\mathbf{p}_i$ y $\mathbf{p}_j$ corresponden a las coordenadas de posición. Se considera que dos individuos interactúan entre sí con posibilidad de colisión, cuando su distancia d_{ij} es menor a la suma $r_{ij} = (r_i + r_j)$, donde las variables sumadas corresponden al radio de la "zona de confort" que se prefiere libre. Si esta zona es invadida, se tenderá a modificar la dirección o velocidad. Se considera además una "fuerza de cuerpo" $k_i(r_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}$ que actúa en contra de la compresión de la zona de confort y una "fuerza de fricción deslizante" $\kappa_i(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$ que impide el movimiento relativo tangencial, para esto $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ es la dirección tangencial y $\Delta v_{ij}^t = (\boldsymbol{v}_j - \boldsymbol{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$ es la diferencia de velocidades tangenciales, k_i y κ_i son ganancias. Conjuntando lo anterior se obtiene la expresión que refleja la fuerza de interacción entre robots móviles u obstáculos dinámicos.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}_{ij} =& A_i exp\left[(r_{ij} - d_{ij})/B_i\right] + k_i g(r_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij} \\ & - \kappa_i g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij} \end{aligned} \tag{3}$$

Donde la función $g(\cdot)$ es cero si no hay interacción entre individuos ($d_{ij} > r_{ij}$) y su argumento en caso contrario.

La interacción con obstáculos estáticos y paredes se trata de forma análoga, esto es, si d_{iw} es la distancia al obstáculo, $\mathbf{n}_{iw}$ denota la dirección perpendicular a él, mientras $\mathbf{t}_{iw}$ la dirección tangencial, la correspondiente fuerza de interacción está dada por:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{f}_{iw} =& A_i exp\left[(r_i - d_{iw})/B_i\right] + k_i g(r_i - d_{iw})\mathbf{n}_{iw} \\ &- \kappa_i g(r_i - d_{iw})(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iw})\mathbf{t}_{iw}.\end{aligned} \quad (4)$$

El planteamiento anterior se realiza sobre una masa puntual cuya meta es moverse en una dirección preestablecida con una velocidad deseada sin considerar su orientación. Para este artículo las ideas generales de Helbing et al. (2001, 2000, 2005) se extienden para ser aplicadas en un robot de tracción diferencial. El objetivo es lograr que el i-esimo robot alcance un punto determinado (x_{d_i}, y_{d_i}) dentro del marco de referencia a partir de la condición inicial (x_{0_i}, y_{0_i}) y se oriente respecto al valor deseado θ_{d_i}, así como evadir los obstáculos que se presenten durante el trayecto. Por lo anterior, el vector de dirección $\boldsymbol{e}_i^0$ se propone con base en la diferencia de los valores actuales y deseados de las variables de posición x_i y y_i como se muestra en (5).

$$\boldsymbol{e}_i^0 = \begin{bmatrix} e_{x_i} \\ e_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d_i} - x_i \\ y_{d_i} - y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

La ecuación anterior provee un vector de dirección que apunta en todo momento hacia la posición final deseada, cuya magnitud es la distancia entre ambos puntos, provocando que, con distancias mayores, el agente se mueva más rápido y que su velocidad decrezca al acercarse a su destino; esto ocasiona que aunque la posición deseada sea alcanzada, el desempeño del robot no sea muy bueno ya que convergerá lentamente. Es por ello que se considera la normalización del vector de dirección, permitiendo que la velocidad deseada v_i^0 se mantenga durante el recorrido y al alcanzarse la posición final el vector de dirección sea nulo, Rodriguez-Angeles et al. (2015).

2.3 Lazo de control interno

Este bloque de control se encarga de convertir las variables entregadas por el lazo de control externo (v_{x_i}, v_{y_i}), en valores de velocidad lineal V_i y rotacional W_i para que el i-esimo robot pueda ser controlado, Sadowska et al. (2011).

Para encontrar la composición de la variable de velocidad lineal, se toman del modelo cinemático las ecuaciones correspondientes a las velocidades $\dot{x}_i$ y $\dot{y}_i$ que homologando la notación representan a v_{x_i} y v_{y_i}, respectivamente. Si se multiplica la primera por $cos(\theta_i)$ y la segunda por $sin(\theta_i)$ y se suman, se encuentra la ecuación para la velocidad lineal V_i (6).

$$V_i = v_{x_i} cos(\theta_i) + v_{y_i} sin(\theta_i) \quad (6)$$

Por otro lado para la descripción de la velocidad angular, se toma la derivada temporal de v_{x_i}, v_{y_i}, al combinarlas con el modelo cinemático (1), se obtiene (7), Sadowska et al. (2011):

$$\begin{aligned}\dot{v}_{x_i} &= \dot{V}_i cos(\theta_i) - W_i v_{y_i} \\ \dot{v}_{y_i} &= \dot{V}_i sin(\theta_i) + W_i v_{x_i}\end{aligned} \quad (7)$$

Considerando (7) se puede establecer una relación que exprese la velocidad angular (8).

$$W_i = \frac{\dot{v}_{y_i} v_{x_i} - \dot{v}_{x_i} v_{y_i}}{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2} \quad (8)$$

El resultado obtenido en (8) es la base para proponer la velocidad angular que se introduce al i-esimo robot.

Primero se introduce una variable de magnitud pequeña $\varepsilon \approx 0$ para evitar la aparición de singularidades cuando el valor de v_{x_i} y v_{y_i} sea cero, Rodriguez-Angeles et al. (2015). Como además de alcanzar una posición, se desea hacerlo con una orientación específica, es necesario considerar el error de orientación $e_{\theta_i} = [\theta_i - \theta_{d_i}]$, este se incorpora al control interno bajo la acción de una ganancia k_{t_i}. La ganancia k_{a_i} se introduce con la finalidad de mejorar la convergencia y garantizar la estabilidad del sistema, lo que resulta en (9).

$$W_i = k_{a_i}\left[\left(\frac{\dot{v}_{y_i} v_{x_i} - \dot{v}_{x_i} v_{y_i}}{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + \varepsilon}\right)\left(\frac{sin(e_{\theta_i})}{e_{\theta_i}}\right) - k_{t_i} e_{\theta_i}\right] \quad (9)$$

Con los resultados (6) y (9), es posible controlar el comportamiento del i-esimo robot utilizando el modelo de fuerzas generalizadas, Helbing et al. (2000), y además adquirir una orientación deseada mediante el lazo de control interno propuesto.

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA EL CASO LIBRE DE COLISIONES

Utilizando el modelo cinemático descrito en (1), las variables del lazo de control externo (2) y las del lazo de control interno (6) y (9) y considerando al sistema libre de colisiones, se realiza el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov, para ello se obtiene el sistema en lazo cerrado en espacio de estados (10).

$$\begin{aligned}
z_{1_i} &= e_{x_i} \;;\; \dot{z}_{1_i} = -z_{4_i} cos^2(\theta_i) - z_{5_i} sin(\theta_i) cos(\theta_i) \\
z_{2_i} &= e_{y_i} \;;\; \dot{z}_{2_i} = -z_{4_i} sin(\theta_i) cos(\theta_i) - z_{5_i} sin^2(\theta_i) \\
z_{3_i} &= e_{\theta_i} \;;\; \dot{z}_{3_i} = k_{a_i}\left[\left(\frac{\dot{z}_{5_i} z_{4_i} - \dot{z}_{4_i} z_{5_i}}{z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2 + \varepsilon}\right)\frac{sin(z_{3_i})}{z_{3_i}} - k_{t_i} z_{3_i}\right] \\
z_{4_i} &= v_{x_i} \;;\; \dot{z}_{4_i} = \frac{1}{\tau_i}(v_i^0 z_{1_i} - z_{4_i}) \\
z_{5_i} &= v_{y_i} \;;\; \dot{z}_{5_i} = \frac{1}{\tau_i}(v_i^0 z_{2_i} - z_{5_i})
\end{aligned} \quad (10)$$

Considerando como función candidata de Lyapunov la forma cuadrática (11).

$$V_i(z_i) = \frac{1}{2}\mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^T \geq 0 \quad (11)$$

Se tiene que su derivada temporal evaluada en el sistema en lazo cerrado resulta en (12).

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(z_i) =& \left[\frac{1}{\tau_i} v_i^0 - cos^2(\theta_i)\right] z_{1_i} z_{4_i} + \left[\frac{1}{\tau_i} v_i^0 - sin^2(\theta_i)\right] z_{2_i} z_{5_i} \\
&+ \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} - sin(\theta_i) cos(\theta_i)\right] z_{2_i} z_{4_i} - \frac{z_{4_i}^2}{\tau_i} - \frac{z_{5_i}^2}{\tau_i} \\
&- \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} + sin(\theta_i) cos(\theta_i)\right] z_{1_i} z_{5_i} - k_{a_i} k_{t_i} z_{3_i}^2
\end{aligned} \quad (12)$$

Para acotar los términos cruzados resultantes se utilizan las propiedades del binomio cuadrado (13).

$$(a+b)^2 \geqslant 0 \quad ; \quad \frac{1}{2}\left(a^2 + b^2\right) \geqslant -ab \quad (13)$$

Después de agrupar términos semejantes, resulta en la desigualdad (14).

$$
\begin{aligned}
&\dot{V}_i(z_i) \leqslant \\
&\quad \frac{1}{2}\left[cos^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) - \frac{v_i^0}{\tau_i}\left(1 - \frac{k_{a_i} sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2}\right)\right] z_{1_i}^2 \\
&+ \frac{1}{2}\left[sin^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) - \frac{v_i^0}{\tau_i}\left(1 + \frac{k_{a_i} sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2}\right)\right] z_{2_i}^2 \\
&+ \frac{1}{2}\left[cos^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) - \frac{v_i^0}{\tau_i}\left(1 + \frac{k_{a_i} sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2}\right)\right] z_{4_i}^2 \\
&+ \frac{1}{2}\left[sin^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) - \frac{v_i^0}{\tau_i}\left(1 - \frac{k_{a_i} sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2}\right)\right] z_{5_i}^2 \\
&- k_{a_i} k_{t_i} z_3^2 - \frac{z_{4_i}^2}{\tau_i} - \frac{z_{5_i}^2}{\tau_i} \qquad (14)
\end{aligned}
$$

Realizando un barrido de los posibles valores que θ_i puede tomar se obtienen las cotas dadas por (15).

$$
\begin{aligned}
-0.2 \leqslant cos^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) \leqslant 1.2 \\
-0.2 \leqslant sin^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) \leqslant 1.2
\end{aligned} \qquad (15)
$$

Al considerar los peores escenarios que pueden tener lugar durante la navegación, se tiene que $v_{x_i} = v_{y_i} = 0$, $cos^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) = sin^2(\theta_i) + sin(\theta_i)cos(\theta_i) = 1.2$ y $|sin(z_{3_i})| = 1$. Sustituyendo lo anterior en (14) se encuentran las restricciones a cumplir para que $\dot{V}_i(z_i)$ sea definida negativa.

$$
v_i^0 > 0 \qquad \tau_i > 0 \qquad k_{a_i} > 0 \qquad k_{t_i} > 0 \qquad \varepsilon > 0
$$

$$
-1 < \frac{k_{a_i}}{\varepsilon} < 1 \qquad\qquad \frac{v_i^0}{\tau_i} > \frac{1.2}{1 - \frac{k_{a_i}}{\varepsilon}}
$$

Finalmente se puede concluir que bajo estas condiciones, el sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable ya que $V_i(0) = 0$, $V_i(z_i) > 0$, $\dot{V}_i(0) = 0$ y $\dot{V}(z) < 0$.

4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Con el fin de evaluar el desempeño de la estrategia de control propuesta, se presentan resultados de simulación en ambientes con y sin obstáculos. Las ganancias usadas para los lazos de control se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros para el control

v^0 $[m/s]$	τ $[seg]$	r $[m]$	k_a	k_t	ε
0.125	0.5	0.4	0.8	0.12	0.001

4.1 Trayectoria libre de colisiones

En la figura 3 se observa que el robot, cuyo cuerpo es representado por un círculo y su orientación por un pentágono inscrito en él, genera una recta consistente con las posiciones inicial y final, en la figura 4 se muestran los errores e_x, e_y, e_θ, donde existe convergencia hacia los valores deseados, en las figuras 5 y 6, se muestra la evolución de los lazos de control externo e interno, respectivamente. Los parametros utilizados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Posiciones iniciales y deseadas

x_0 $[m]$	y_0 $[m]$	θ_0 $[rad]$	x_d $[m]$	y_d $[m]$	θ_d $[rad]$
0	-0.5	0	1.5	0.5	0

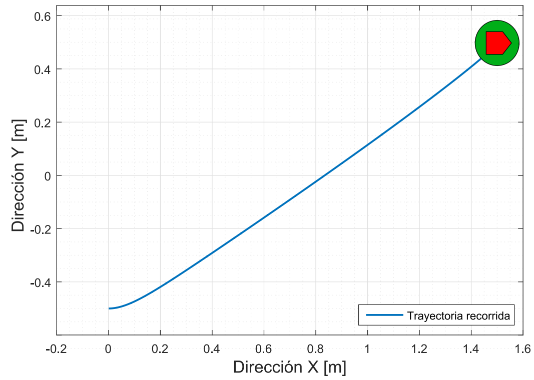

Fig. 3. Trayectoria libre de colisiones (Simulación)

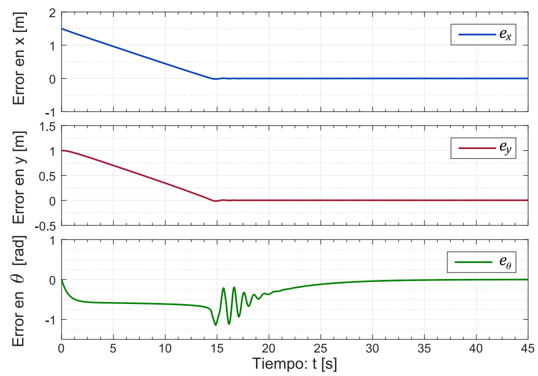

Fig. 4. Errores de posición y orientación, trayectoria sin colisiones (Simulación)

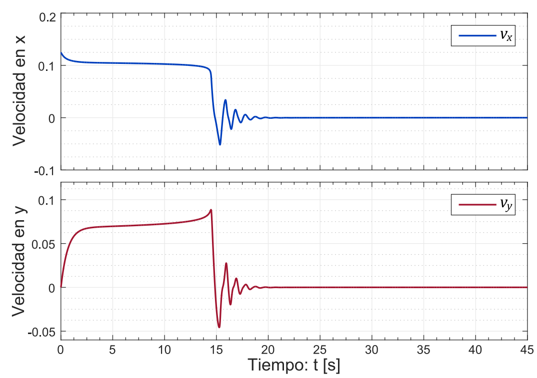

Fig. 5. Variables del lazo de control externo, trayectoria sin colisiones (Simulación)

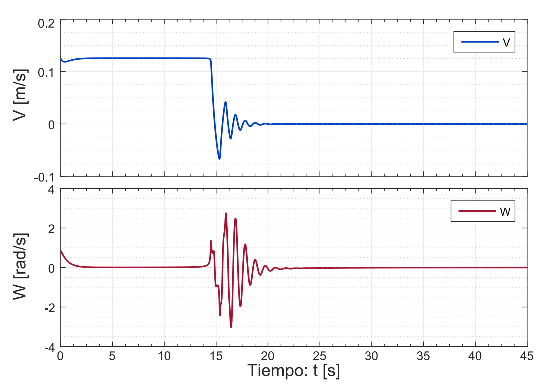

Fig. 6. Variables del lazo de control interno, trayectoria sin colisiones (Simulación)

4.2 Trayectoria con posibilidad de colisión

Se simuló también una trayectoria donde se considera un obstáculo estático que corresponde al círculo gris en la figura 7, nuevamente se muestran el recorrido del robot, los errores e_x, e_y, e_θ, las variables del lazo de control externo y del lazo de control interno en las figuras 7, 8, 9 y 10, respectivamente, los parámetros de posición se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Posiciones iniciales y deseadas

x_0 $[m]$	y_0 $[m]$	θ_0 $[rad]$	x_d $[m]$	y_d $[m]$	θ_d $[rad]$
0	-0.5	0	2	0.1	$-\pi/6$

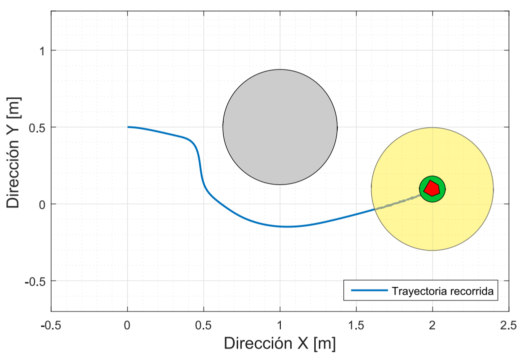

Fig. 7. Trayectoria con obstáculo (Simulación)

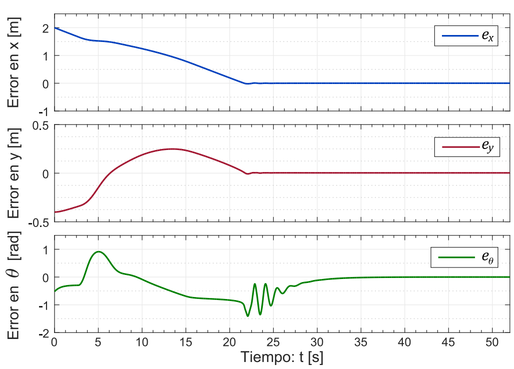

Fig. 8. Errores de posición y orientación, trayectoria con obstáculo (Simulación)

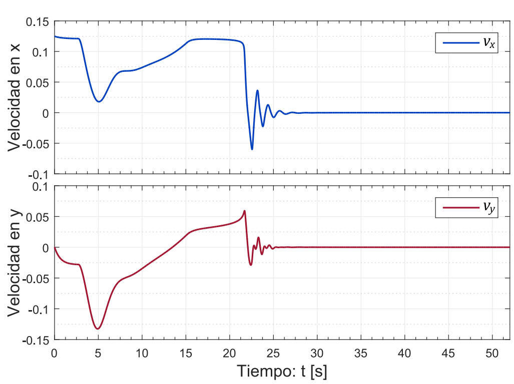

Fig. 9. Variables del lazo de control externo trayectoria con obstáculo (Simulación)

En la figura 7, se muestra la ya mencionada zona de confort, representada por el circulo que rodea al robot, ésta al ser penetrada por el obstáculo produce un cambio

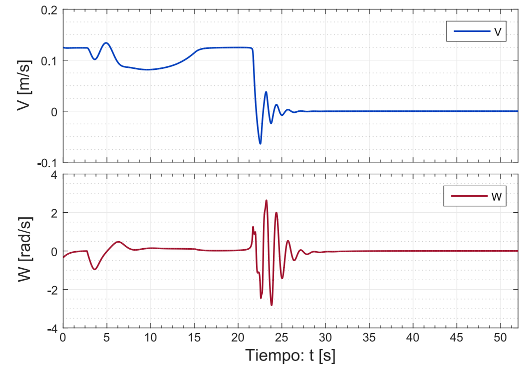

Fig. 10. Variables del lazo de control interno trayectoria con obstáculo (Simulación)

en las fuerzas de interacción, lo cual genera modificaciones en la dirección con la finalidad de evitar colisiones. La rapidez de giro del robot y que tanto debe alejarse del obstáculo se regula mediante la combinación de ganancias k y κ.

En ambos casos se hace evidente que la ley de control funciona correctamente, haciendo que el robot móvil alcance la posición y orientación deseados, corroborando los resultados de convergencia obtenidos teóricamente.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con la finalidad de evaluar el desempeño del esquema de control de navegación, éste se programa en un prototipo de robot diferencial. Tiene un diámetro de ruedas nominal $r_w = 6.56\,cm$ con una distancia entre las mismas de $2l = 12.6\,cm$, cuenta con una rueda pasiva omnidireccional para mantener la estabilidad, tiene $17\,cm$ de diámetro por $7.5\,cm$ de altura, los motores conectados directamente a las ruedas cuentan con un encoder de cuadratura con resolución $n_e = 1920$ pulsos por revolución. El control de velocidad para ambos motores es realizado por medio de PID's individuales que regulan la señal PWM que se envía al módulo puente H, la relación entre las velocidades lineal, angular y la velocidad de cada rueda está dada por (16).

$$w_i = \frac{1}{r_w}\big(V - lW\big) \qquad ; \qquad w_d = \frac{1}{r_w}\big(V + lW\big) \quad (16)$$

Donde w_i y w_d representan la velocidad angular de las ruedas izquierda y derecha, respectivamente. La estimación de la posición relativa del robot dentro de un marco de referencia fijo se realiza por odometría. El robot está equipado con sensores infrarrojos que permiten conocer la distancia hacia los obstáculos, haciendo posible programar la estrategia de control directamente en el robot móvil.

Por cuestiones de espacio en el artículo se presenta solamente el caso con posibilidad de colisión. Las pruebas se realizan bajo las mismas condiciones iniciales y deseadas que las utilizadas en simulación para que la comparación de resultados sea lo más directa y transparente posible.

Se consideró un obstáculo fijo, el cual coincide en dimensión y posición con el de la simulación, con esto se pone a prueba el control de navegación Bio-inspirada para la evasión de obstáculos. Los parámetros usados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros experimentales

v^0 $[m/s]$	τ $[seg]$	r $[m]$	k_a	k_t	ε
0.125	0.5	0.4	0.8	0.12	0.001

En la figura 11 se observa el desempeño del robot, los errores de posición y orientación en la figura 12 y las variables de los lazos de control externo e interno se muestran en las figuras 13, 14, respectivamente.

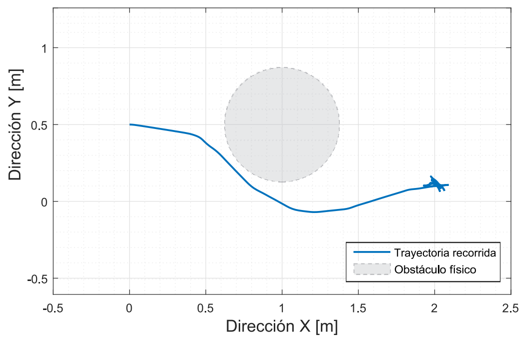

Fig. 11. Trayectoria con obstáculo (Experimental)

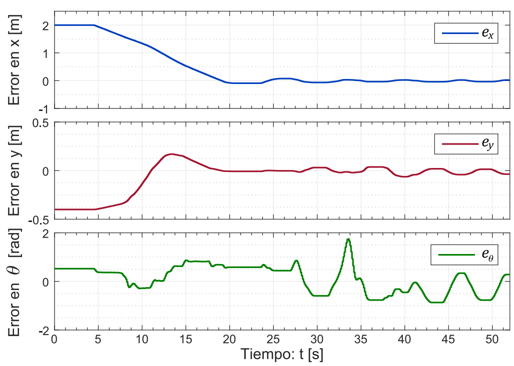

Fig. 12. Errores de posición y orientación, trayectoria con obstáculo (Experimental)

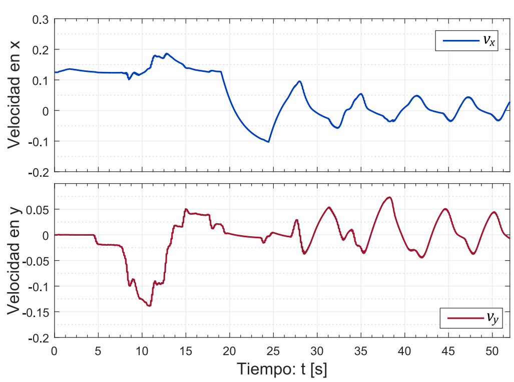

Fig. 13. Variables del lazo de control externo trayectoria con obstáculo (Experimental)

En los resultados experimentales se observa una oscilación acotada al final del recorrido, esto se debe a limitaciones propias de los motores usados, pues no pueden reproducir movimientos tan pequeños, aunado a que la posición se estima por odometría, que por sí sola implica desviaciones. Incluso considerando lo anterior, el desempeño del robot es bueno y semejante al sistema simulado.

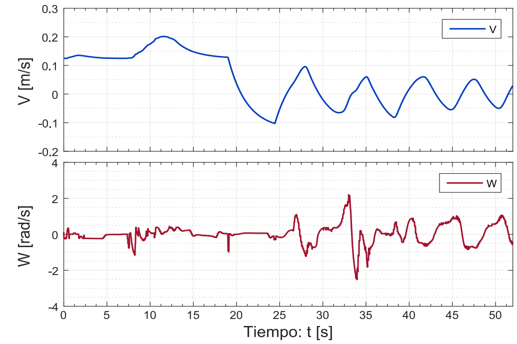

Fig. 14. Variables del lazo de control interno trayectoria con obstáculo (Experimental)

6. CONCLUSIONES

Parte importante del trabajo es la extensión realizada, partiendo de un modelo desarrollado para simular los efectos de fuerzas socio-psicológicas presentes en la movilidad de organismos biológicos para inducirlo, bajo ciertas consideraciones, a un robot de tracción diferencial con el objetivo de utilizarlo como un control de navegación autónoma, que además de llevar al robot desde un punto inicial a otro deseado, sea capaz de orientarlo con un ángulo previamente definido y evitar colisiones con obstáculos.

Al realizar una comparación de los resultados experimentales y simulados, es fácil observar que a pesar de que el comportamiento no es exactamente el mismo, principalmente por las ganancias manejadas y las limitaciones de los dispositivos físicos utilizados, se captura el comportamiento dinámico esperado, el cual es comprobado formalmente mediante el método de Lyapunov. El comportamiento inducido al robot móvil se asemeja al de una persona dirigiéndose de una posición inicial a otra deseada con la necesidad de evadir obstáculos en el trayecto.

REFERENCIAS

Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., and Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science*, 39(1), 1–24.

Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.

Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I.J., and Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and planning B: planning and design*, 28(3), 361–383.

Rodriguez-Angeles, A., van Kuijk, F.J.M., and Nijmeijer, H. (2015). A controller for autonomous navigation for differential mobile robots based on crowd dynamics. *XVII Congreso Mexicano de Robótica.*

Sadowska, A., den Broek, T.v., Huijberts, H., van de Wouw, N., Kostić, D., and Nijmeijer, H. (2011). A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling. *International Journal of Control*, 84(11), 1886–1902.

Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., and Shochet, O. (1995). Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical review letters*, 75(6), 1226.