

## Capítulo 7 Sistema Biomimético para la navegación autónoma en entornos desconocidos

### Chapter 7 Biomimetic system for navigation in unknown environments

SIORDIA-VASQUEZ, Xóchitl<sup>1\*</sup>†, ROJAS-HERNÁNDEZ, Miguel Ángel, MILLÁN-TEJEDA, José Omar<sup>2</sup> y GARCÍA-RAMOS Roman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Prolongación Venustiano Carranza s/n. Col. Revolución, Poza Rica, Veracruz, México, C.P 93390.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica, Luis Donaldo Colosio s/n, Col. Arroyo del maíz, Poza Rica, Veracruz, México, C.P 93230.

ID 1<sup>er</sup> Autor: Xóchitl, Siordia-Vásquez / **ORC ID:** 0000-0002-8472-8001

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Miguel Ángel, Rojas-Hernández / **ORC ID:** 0000-0001-9294-5842

ID 2<sup>do</sup> Coautor: José Omar, Millán-Tejeda / **ORC ID:** 0000-0002-2405-6696, **CVU CONACYT ID:** 744814

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Román, García-Ramos / **ORC ID:** 0000-0003-3673-0008

**DOI:** 10.35429/H.2019.2.88.97

X. Siordia, M. Rojas, J. Millán y R. García

xsiordia@uv.mx

A. Marroquín, J. Olivares, P. Díaz y L. Cruz. (Dir.) La invención y las mujeres en Mexico. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2019.

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un sistema biomimético para el control de la navegación de un vehículo terrestre no tripulado que mapea y localiza obstáculos cambiantes en entornos desconocidos mediante un autómatas celular que utiliza una estructura de hardware basada en células hexagonales organizadas de forma similar a la estructura de un panal de abejas. El autómatas está diseñado como una adaptación del algoritmo bioinspirado en la danza que las abejas emplean para localizar la mejor fuente de alimento. En este sistema biomimético las abejas están representadas por seis sensores láser ToF por tiempo de vuelo montados sobre células hexagonales para cubrir 360° de visión. El autómatas se programa en el software Python y se implementa el sistema embebido en una tarjeta Raspberry Pi 3B. Para validar los resultados, se efectúa el prototipo robótico de un vehículo terrestre de cuatro ruedas, no tripulado, que es controlado por el sistema embebido. Los resultados muestran que el uso de algoritmos bioinspirados permite que el robot se adapte y en tiempo real resuelva el problema de la localización de obstáculos cambiantes, sin necesidad de usar cámaras; facilitando su navegación autónoma cuando está inmerso en un ambiente de navegación desconocido.

## Biomimético, Algoritmos bioinspirados, Colonia artificial de abejas, Robot autónomo

### 1. Introducción

Brindar la capacidad a un robot móvil para determinar su ubicación espacial y detectar los objetos que se encuentran en su ambiente de navegación es una tarea imprescindible de las técnicas de mapeo robótico. El mapeo robótico se enfoca a resolver el problema de adquisición de los modelos espaciales en entornos físicos, en este ámbito se han desarrollado métodos probabilísticos que logran mapear ambientes estáticos con entornos de navegación pequeños con trayectorias previamente planificadas donde los objetos están plenamente identificados.

Las técnicas que principalmente se emplean están fundamentadas en el uso de filtros kalman, filtros de partículas o algoritmos de máxima verosimilitud (Cruz Jimenez, 2017). A pesar de que estas técnicas son robustas sus principales problemáticas son la complejidad computacional de los algoritmos de mapeo debido a que requieren recrear los modelos geográficos utilizando un software especializado y cámaras; ambos aspectos reducen la capacidad de procesamiento del hardware que captura, almacena, procesa y toma decisiones a partir de las imágenes que se obtienen desde la cámara (Fajardo, 2012) lo cual limita su aplicabilidad si se desea mapear de manera simultánea entornos desconocidos, no estructurados, de gran escala, y con objetos dinámicos, siendo éste un campo de investigación abierto y continuo para el diseño de complejos sistemas de navegación robótica (Enriquez, 2017).

Recientemente para la solución de problemas complejos en la robótica se ha utilizado la biomímesis (León, 2018) o rama de la ciencia que estudia la naturaleza e intenta traducir los principios de los sistemas biológicos en técnicas de ingeniería para representar comportamientos complejos a partir de reglas simples (Fernández, 2019) y en este artículo se demuestra su utilidad para el diseño de un sistema de navegación robótica cuando el entorno de navegación es desconocido y con obstáculos cambiantes (Editores, 2011). En este artículo se presenta un sistema biomimético de navegación robótica que imita un hardware similar a la arquitectura hexagonal que forman las células hexagonales de un panal de abejas y propone un método de detección y evasión de obstáculos que se adapta de un algoritmo bioinspirado en la colonia artificial de abejas, ABC que simula la forma que las abejas emplean para calcular la distancia y localización de su fuente de alimento (Torres Terrazas, 2016). En el sistema propuesto las abejas están representadas por sensores láser ToF por tiempo de vuelo, modelo VL53LOX que se montan al interior de las células hexagonales. El algoritmo bioinspirado se diseña como un autómatas de estados finitos que se programa en Python y se implementa como un sistema embebido sobre una tarjeta Raspberry Pi modelo 3B. Para la validación de los resultados el sistema biomimético se implementa en el prototipo robótico de un vehículo terrestre no tripulado de cuatro ruedas y se realizan pruebas de navegación en un ambiente externo, desconocido y con obstáculos cambiantes.

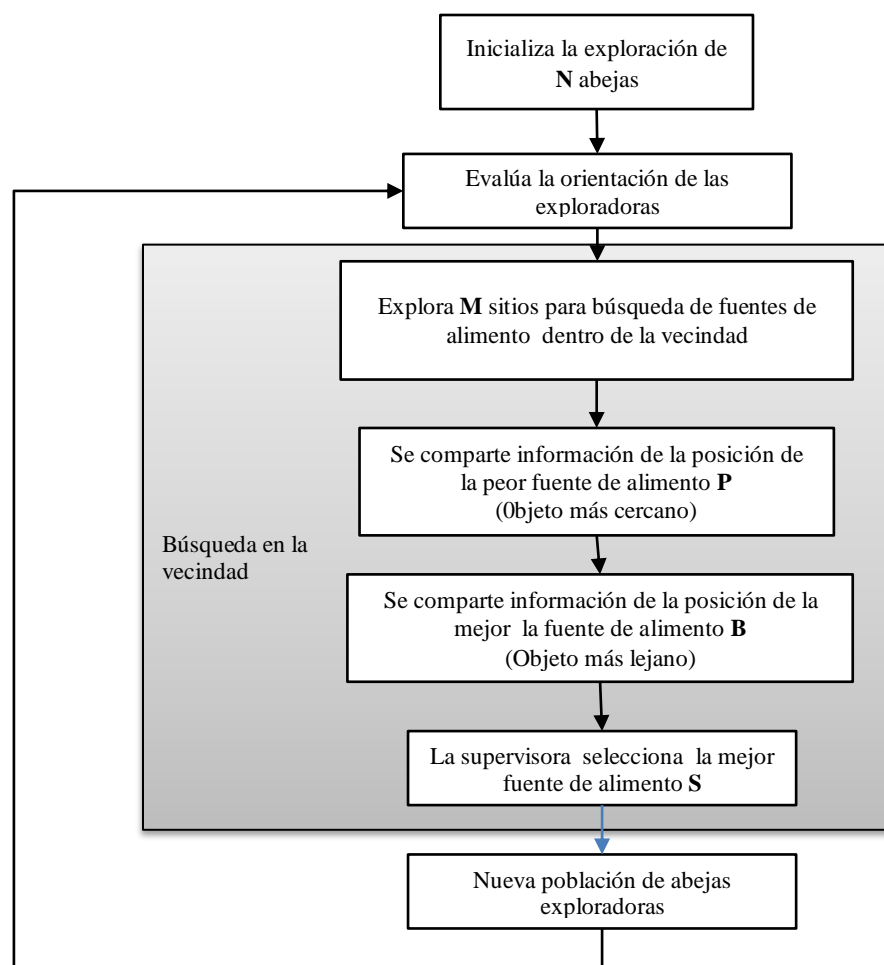
La organización de este trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se explica el modelamiento del sistema biomimético, en la sección 3 se describe la implementación del autómatas embebido como un sistema en la Raspberry Pi 3B.

En la sección 4 se presenta la implementación del prototipo y la respuesta del sistema biomimético cuando el prototipo robótico navega en un entorno desconocido y con obstáculos cambiantes se verifica que realice las acciones evasoras según la regla de navegación definida por el autómata y finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo realizado y su aportación a la tecnología de mapeo robótico de sistemas de navegación híbridos reactivos e intuitivos.

## 2. Modelamiento del sistema biomimético

El método que se propone en este trabajo es una versión modificada del algoritmo ABC, Artificial Bee Colony, propuesto por D. Karaboga (Karaboga & B. Akay, 2012) que se inspira en el comportamiento del enjambre de abejas cuando buscan una fuente de alimento. El conjunto de soluciones consta de un conjunto de fuentes de alimento y tres clases de abejas, obreras, supervisoras y scouts. La posición de la fuente se codifica mediante un ángulo de orientación mientras que la calidad está asociada con la cantidad de néctar que la fuente contiene. Las abejas simbolizan los agentes que operan sobre las fuentes de alimento para generar soluciones candidatas. Las obreras exploran el vecindario de la fuente que tienen asignada y comparten información con la supervisora y éstas tienden a seleccionar las mejores fuentes de alimento por otra parte las scouts salen a explorar a detalle el vecindario en busca de otras fuentes de características similares (F. J. Rodríguez, 2013). La adaptación del algoritmo se esquematiza en la Figura 7.1, teniendo en cuenta el estado de los vecinos utilizando la regla que se ha definido en (J.Sepulveda, 2004).

**Figura 7.1** Algoritmo bioinspirado y adaptado del artificial bee colony



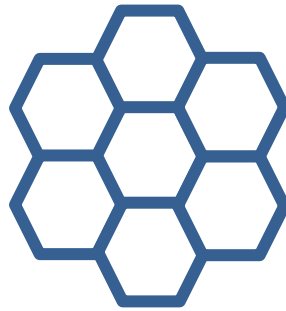
Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

### 2.1. Diseño del sistema de adquisición de datos del entorno

El diseño del sistema de adquisición de datos se fundamenta en una arquitectura de celdas hexagonales con 6 sensores que se colocan estratégicamente con una separación de  $60^\circ$  cada uno para lograr un campo de visión de  $360^\circ$  para economizar perímetro y maximizar el área logrando que las piezas encajen sin dejar espacios entre ellas sin traslaparse. Dicha estructura se muestra en la Figura 7.2.

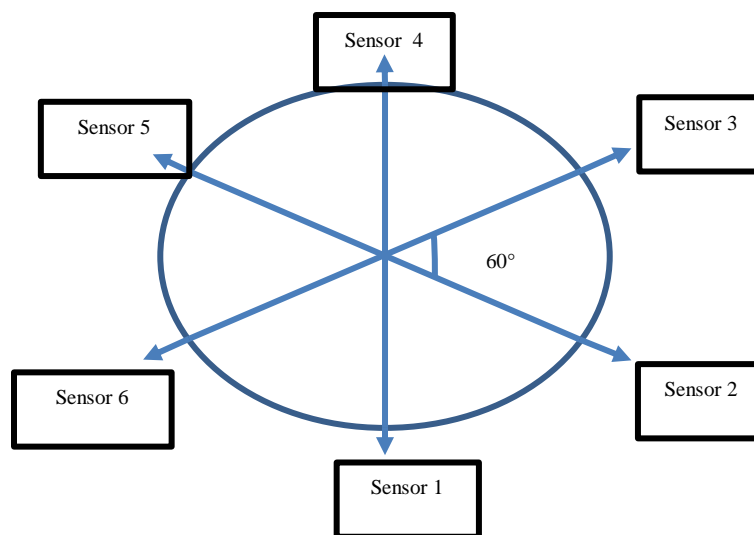
El algoritmo bioinspirado requiere la evaluación constante del entorno de navegación y en este caso lo proporciona la lectura de un arreglo de 6 sensores láser ToF distribuidos bajo el esquema de la Figura 7.3.

**Figura 7.2** Arquitectura hexagonal bioinspirada en el panal de abejas



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

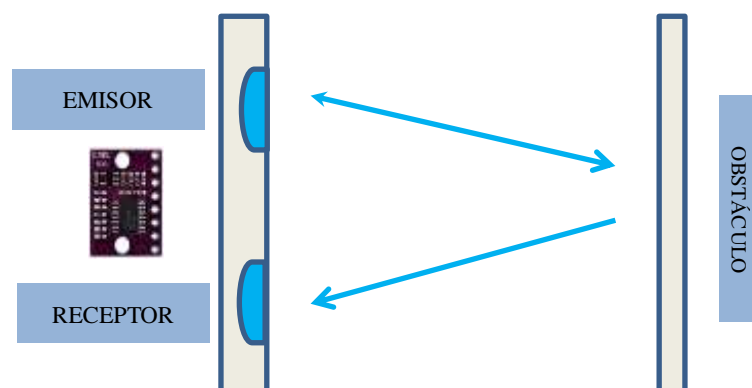
**Figura 7.3** Organización del arreglo de sensores



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

Este tipo de sensores ToF por tiempo de vuelo modelo VL53L0X que se ilustra en la Figura 4. contienen una fuente de luz láser invisible con un ángulo de cobertura de  $60^\circ$  y un sensor de coincidencia que detecta la distancia por tiempo de vuelo como un parámetro del tiempo que tarda el haz de luz en regresar al sensor y su principio de funcionamiento se fundamenta en la ecuación 1.

**Figura 7.4** Sensor láser ToF por tiempo de vuelo compatible con Raspberry



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

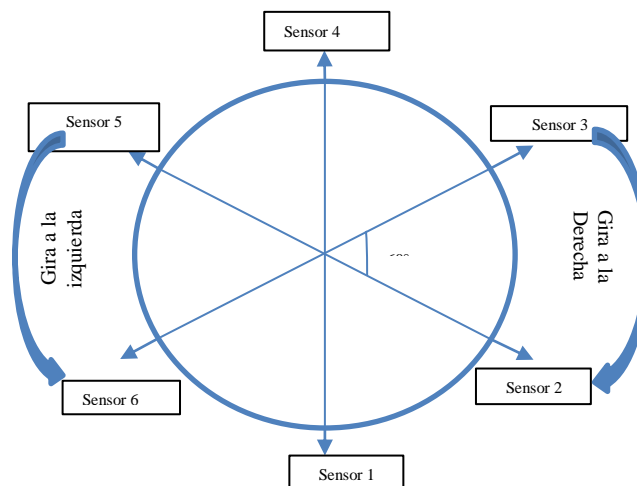
$$= \text{Velocidad de la luz} \times \frac{\text{Tiempo}}{2} \tag{1}$$

**2.2. Descripción del modelamiento del sistema y generación de la regla**

La regla de localización de los obstáculos y la elección de la ruta de evasión se realizan desde el autómata. El autómata celular se diseña como un arreglo n dimensional de unidades llamadas células que en ese caso están representadas por cada sensor. Cada célula posee una cantidad de estados finitos que están interconectados entre sí de manera conocida. Cabe señalar que sin la presencia de obstáculo los sensores arrojan de manera permanente un bit en estado 0 hacia el bus de datos de la memoria, ante la presencia de obstáculos se envía un bit de estado 1. El autómata establece el un vecindario entre los 6 sensores de modo que el sensor 1 representa al bit menos significativo y el sensor 6 al bit más significativo respectivamente en el bus de datos de la tarjeta Raspberry Pi, formando un vecindario de 2<sup>6</sup> posibles obstáculos candidatos.

El estado actual de la célula no cambia mientras que el sensor no detecte ningún objeto haciendo que el vehículo avance libremente. Si en el sensor 1 se detectará un obstáculo el autómata codificaría la secuencia 000001, de tal modo que cada secuencia de entrada del vecindario que se establece se corresponde con el ángulo donde se encuentra ubicado el sensor el cual servirá de referencia al autómata para que tome la decisión de evadir el obstáculo haciendo que los motores del vehículo terrestre giren hacia la izquierda o derecha según se ilustra en la tabla 7.1 siguiendo las acciones evasoras de la Figura 7.5.

**Figura 7.5** Detección y evasión de obstáculos



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

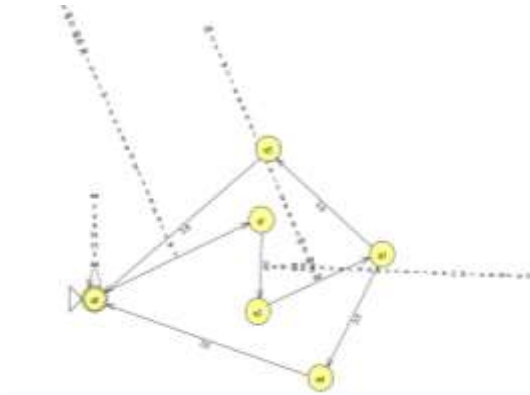
**Tabla 7.1** Conjunto de acciones evasoras y entrada al puente H

δ	Entrada al puente H		Estado de la rueda
	Rueda delantera y trasera derecha	Rueda delantera y trasera izquierda	
q <sub>0</sub>	01	01	Avanzar
q <sub>1</sub>	00	00	Detener
q <sub>2</sub>	10	10	Toma de decisión
q <sub>3</sub>	01	00	Gira a la derecha
q <sub>4</sub>	00	01	Giro a la izquierda
q <sub>5</sub>	11	11	Estado prohibido

Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

Para realizar la navegación se debe tener en cuenta que mientras el sistema no detecte ningún obstáculo vehículo debe avanzar y en caso contrario deberá reducir la velocidad de los motores trasero y delantero proporcionalmente con la distancia y girará al lado indicado debido a la diferencia de velocidades entre sus motores. El modelamiento del autómata se ilustra en la Figura 7.6 y se utiliza el Software JFLAP para comprobar su correcto desempeño.

**Figura 7.6** Modelado de autómata en JFLAP

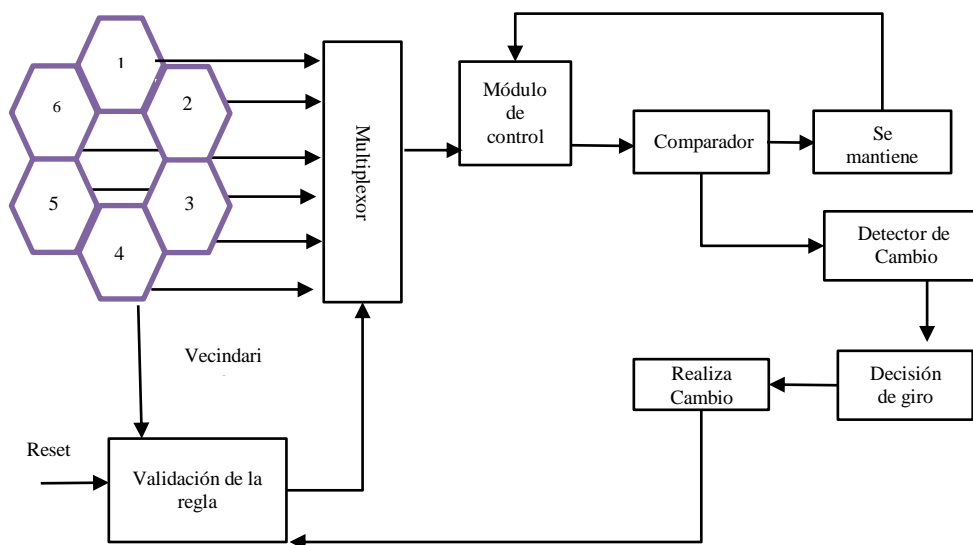


Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

### 3. Implementación del autómata en el sistema embebido

En la Figura 7.7 se muestra el esquema general de del sistema embebido donde se observa la estructura hexagonal como células de un vecindario establecido para la interconexión de los sensores, el módulo de control, un comparador y la validación de la regla.

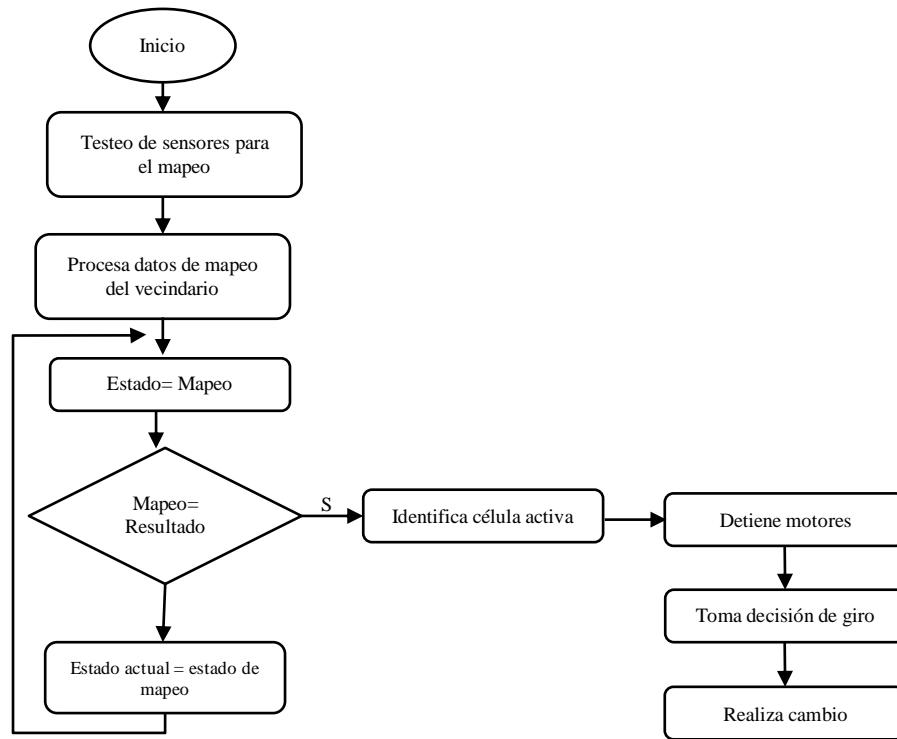
**Figura 7.7** Diagrama general del sistema embebido



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

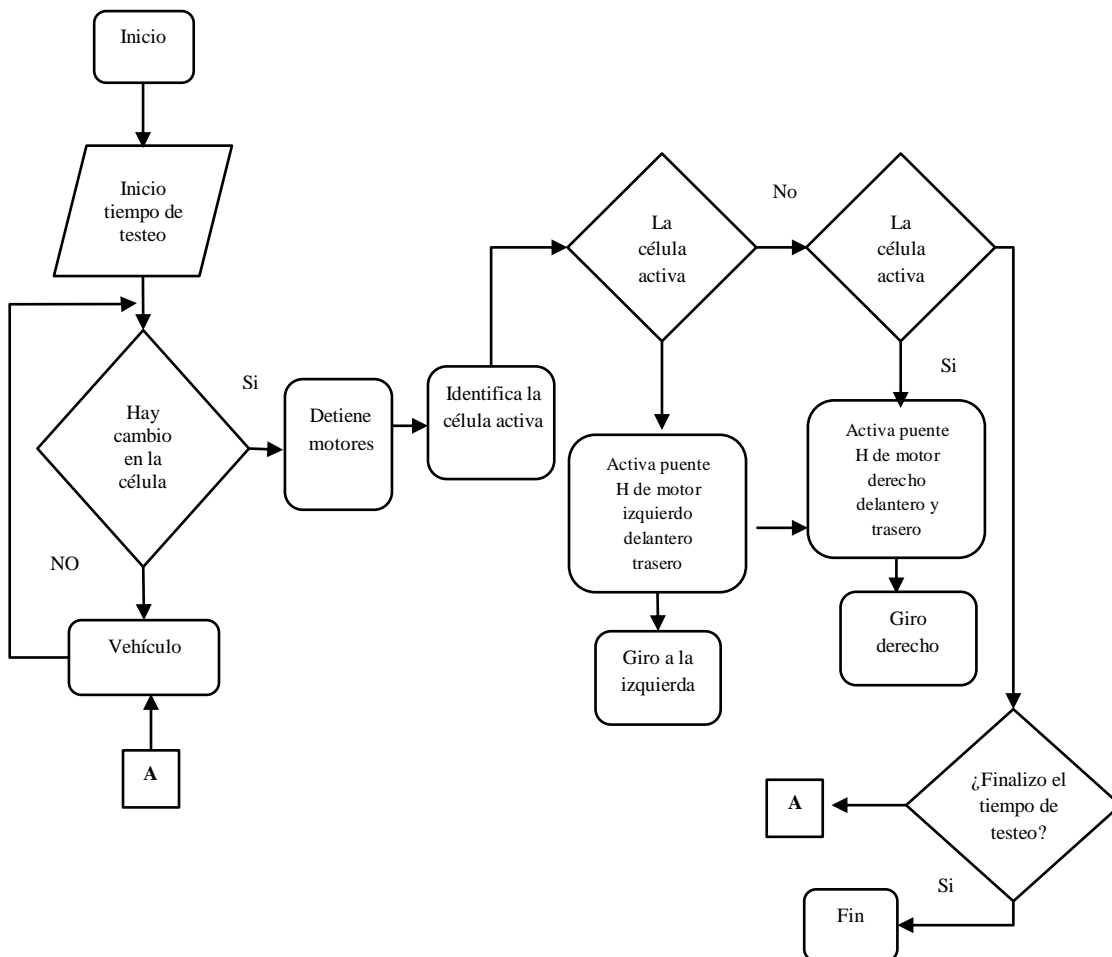
El multiplexor se emplea para seleccionar entre el dato generado por el mapeo que realiza cada uno de los sensores con respecto a la localización de los objetos que cada uno de ellos encuentra en el entorno de navegación. El módulo de control se encarga de manejar el sincronismo de detección de objetos en cada celda y su interacción con el vecindario de las otras celdas que forman el panel, y en la Figura 7.8 se esquematiza el diagrama de flujo que lo representa. El comparador es responsable de comparar el valor del estado anterior con el actual, para determinar si se ha detectado un obstáculo o evaluar cuando la célula permanece en estado estático sin cambio. Si existiera cambio en la célula indica que se ha detectado un obstáculo y el algoritmo mediante un módulo de decisión detiene los motores y evalúa la posición de la célula activa en función de la regla establecida para el vecindario, la identificación de la célula activa es útil para que el autómata determine si la ruta de evasión está al girar a la derecha o a la izquierda, toma la decisión y activa los puentes H de los motores delantero y trasero de la ruta elegida, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 7.9.

**Figura 7.8** Diagrama de flujo del módulo de control



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

**Figura 7.9** Diagrama de flujo del módulo de decisión

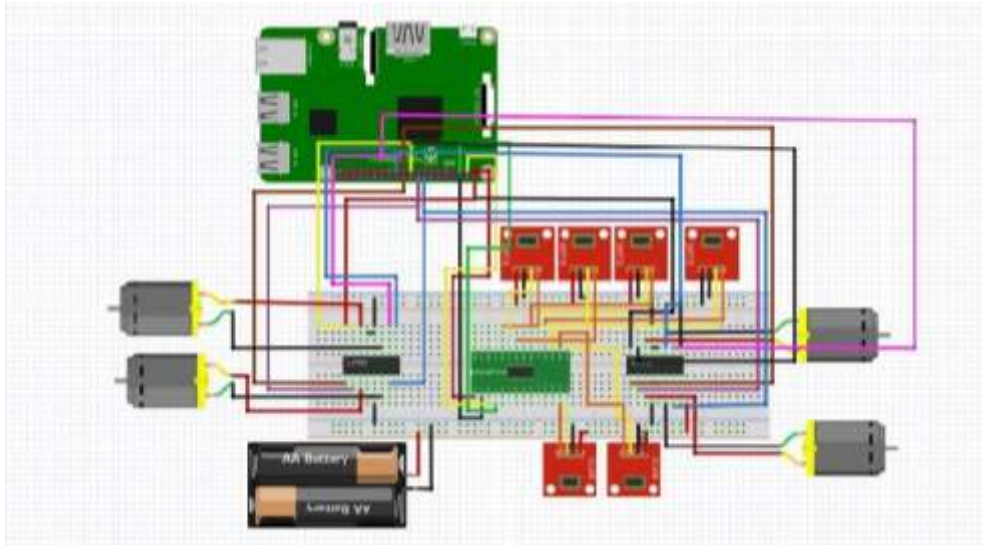


Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

Si existiera cambio en la célula, el algoritmo indica que se ha detectado un obstáculo, y de acuerdo a las reglas establecidas en el módulo de decisión hace detener a los motores y evalúa la posición de cada una de las células activas desde la regla establecida para el vecindario. La correcta identificación de cada célula activa es útil para que el autómata determine la ruta de evasión y tome la decisión de girar a la derecha o a la izquierda, activando los puentes H de los motores delantero y trasero de la ruta elegida, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 7.9.

En la Figura 7.10 se describe el diagrama de flujo del algoritmo que se programa en el software Python y se implementa en el sistema embebido definido por la Raspberry Pi modelo 3B siguiendo el esquema electrónico de la Figura 7.10.

**Figura 7.10** Esquema del sistema embebido en la Raspberry Pi 3B



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

En la Figura 7.11 se muestra la implementación del sistema embebido para el control de los motores de acuerdo con la regla de navegación definida para el autómata.

**Figura 7.11** Implementación del sistema biomimético en vehículo terrestre



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

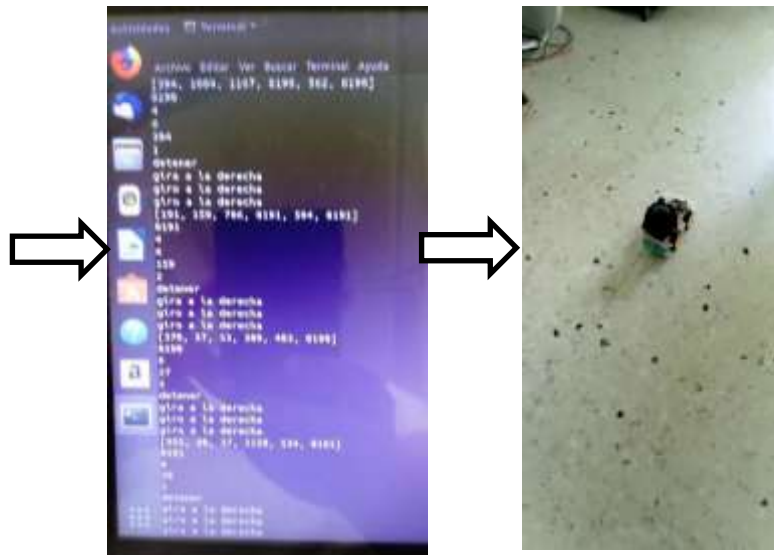
#### 4. Resultados

Una vez que se han implementado el autómata en la tarjeta Raspberry Pi 3B se procede a la implementación del prototipo del sistema biomimético en el vehículo terrestre no tripulado como se ilustra en la Figura 7.12.



Con el montaje realizado se efectuaron pruebas de navegación para validar el correcto desempeño del autómatas cuando se efectuó la navegación en un entorno grande, externo y no controlado como se ilustra en la Figura 7.12.

**Figura 7.12** Implementación del sistema biomimético



Fuente: (Siordia, Rojas, Muñoz, & Herrera, 2018)

## 5. Agradecimiento

Agradecemos Universidad Veracruzana por todas las facilidades prestadas para la realización de este proyecto elaborado dentro de las actividades de investigación del cuerpo académico “Modelado y Simulación de Sistemas Robóticos Inteligentes” con Fondos Prodep 2017.

## 6. Conclusiones

En el presente artículo se comprobó que el uso de autómatas celulares resulta ser una herramienta muy poderosa para elaborar modelos descriptivos de sistemas físicos que pueden ser modelados más fácilmente mediante el uso de diagramas y funciones de transición.

El sistema de navegación que se implementó en el sistema embebido permite el mapeo de entornos desconocidos logrando detectar de manera simultánea obstáculos cambiantes sin el uso de los complejos algoritmos computacionales que emplean las técnicas de procesamiento de imágenes.

El uso de sensores minimizan el costo computacional ya que permite el diseño de sistema para control de navegación no solo reactivo sino también intuitivo ya que el algoritmo bioinspirado le permite al sistema tomar decisiones a partir del mecanismo que mapea las células activas en un entorno en 360° logrando no tan solo detectar obstáculos sino que además identifica su ubicación y determina la ruta de evasión, demostrando que es viable su uso para ser implementado en sistemas de navegación de vehículos terrestres o aéreos no tripulados.

El uso de la estructura de células hexagonales permite maximizar el área sin aumentar el perímetro ofreciendo la posibilidad de agregar sensores para el monitoreo de otras variables de interés que sean útiles, situación que en las estructuras circulares propuestas por el sistema Teraranger no es posible de realizar ya que utilizan estructuras circulares que no son posibles de modificar. Estas estructuras circulares requieren como mínimo 12 sensores infrarrojos para monitorear de forma similar un entorno de 360°, siendo esta una desventaja con respecto al sistema que en este documento se propone ya que se ha demostrado que es posible realizar este mapeo utilizando solo 6 sensores.

Se recomienda integrar al sistema un sensor de gps que permita la localización espacial del vehículo para ayudar a planificar otras acciones de navegación que van más allá de su campo de percepción local e integrar técnicas de aprendizaje artificial que le permitan al sistema clasificar los escenarios y tipos de objetos representando las áreas del trabajo futuro para esta investigación.

## Referencias

- Cambridge University, P. (2016). Cambridge Dictionary. Obtenido de <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/navigation>
- Cruz Jimenez, B. C. (Junio de 2017). Diseño de una aplicación móvil para la detección de proximidad de objetos basada en sensores. *ECORFAN Revista de Tecnologías Computacionales*, 1(2), 1-8.
- Editores, G. M. (Ed.). (2011). *Darwin y las ciencias del comportamiento* (German Gutierrez y Mauricio Papini ed.). Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Enriquez, I. C. (2017). *Diseño y navegacion de un vehículo terrestre no tripulado con sistema de navegacion autonomo*. Cd. de México: Universidad Autonoma de México.
- F. J. Rodriguez, M. L.-M.-B. (2013). An artificial bee colony algorithm for the maximally diverse grouping problem. *Information Sciences*(230), 183-196.
- Fajardo, M. H. (December de 2012). SLAM maps builder system for domestic mobile robots navigation. *ECORFAN Journal Computing*, Vol. 3(8), 871-878.
- Fernández, H. V. (2019). ¿ Qué tan natural es la inteligencia artificial? Sobre los límites y alcances de la biomímesis computacional. *Naturaleza y Libertad*, 12, 237-258. doi:<http://dx.doi.org/10.24310/NATyLIB.2019.v0i12.6277>
- J.Sepulveda, C. S. (2004). *Metodología de implementacion de automatas celulares en FPGA*. IBERCHIP.
- Karaboga, D., & B. Akay. (2012). A modified artificial bee colony algorithm for realparameter. *Information Sciences*,, 192, 120-142.
- Schworer, I. (2005). *Navigation and control of an autonomous vehicle*. Virginia: Virginia Polythecnic Institute.
- Sinder, J. (2009). *Automatic Steering Methods for Autonomous*. Pitsburg: Caenegie Mellon University.
- Siordia, V. X., Rojas, H. M., Muñoz, G. L., & Herrera, G. M. (2018). *Sistema Biomimético de detección de obstáculos para el control de navegación de vehículos no tripulados basado en un arreglo de sensores láser de distancia por tiempo de vuelo "To F"*. Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Poza Rica de Hidalgo.
- Torres Terrazas, G. E. (2016). Swarm algorithms. *Journal Boliviano de Ciencias*, 12(36), 23-29.