

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA EL  
CONTROL DE FORMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE TAREAS****DESING AND CONSTRUCTION OF A ROBOTICS PLATFORM FOR  
FORMATION CONTROL AND TASK DISTRIBUTION**

**Ing. Daniel Felipe Leon Cardona\***, **PhD. Hernan Gonzalez Acuña\*\***, **MSc. Carlos Forero Gonzalez\*\***

\* **Universidad Industrial de Santander** Programa Maestría en ingeniería Mecánica.  
Cra 27 calle 9 Ciudad Universitaria. Bucaramanga, Santander, Colombia.  
PBX (607) 6344000

E-mail: [daniel2198191@correo.uis.edu.co](mailto:daniel2198191@correo.uis.edu.co).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6630-0522>

\*\* **Universidad Autónoma de Bucaramanga**, Facultad Ingeniería, Ingeniería Mecatrónica.  
Avenida 42 No. 48 – 11, Bucaramanga, Santander, Colombia.  
PBX (607) 643 6111/643 6261

E-mail: {hgonzalez3, [cofero3](mailto:cofero3@unab.edu.co)}@unab.edu.co.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2118-2272>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4607-2750>

**Resumen:** En este artículo se describe el diseño e implementación de una plataforma robótica que permita la validación de algoritmos para el control de formación de robots móviles y la distribución de tareas. Inicialmente se presenta la selección del sistema de locomoción y sensores que tendrá el robot móvil, así como la descripción del sistema de visión que permitirá retroalimentar la posición de los robots. Seguidamente, se presenta el diseño del control de velocidad para cada rueda del robot móvil y la selección de la estrategia de distribución de los robots móviles. Finalmente, son presentados los resultados obtenidos para 2 tipos de formación deseadas con los robots móviles.

**Palabras clave:** Robots móviles, control de formación de robots, control de posición, visión por computador.

**Abstract:** The paper describes the design and construction of a robotic platform to test algorithms that allows formation control of multi robots and task distribution. First, the locomotion system and mobile robot sensors are selected. Moreover, the computer vision system to feedback the robot's position is described. Then, the design of wheel speed control for each one and the selection of the distribution strategy of the mobile robots are presented. Finally, the results obtained for 2 types of formation robots are presented.

**Keywords:** Mobile robots, formation control, position control, computer vision.

## 1. INTRODUCCIÓN

En robótica existen 2 enfoques para realizar una tarea. El primero es diseñar un robot con la

capacidad de realizar todas las actividades requeridas y cumplir el objetivo propuesto. Este enfoque se caracteriza por una mayor facilidad en configuración, control y manufactura, sin embargo, trae como desventaja la alta posibilidad de detener su misión si se presenta un malfuncionamiento en el robot que obligue a detener su operación. Para evitar esta situación, se presenta otro enfoque que consiste en distribuir la misma tarea entre varios robots. Lo cual requiere un mayor grado de dificultad para la coordinación, programación, construcción y comunicación, sin embargo, la misión se puede completar inclusive si falla uno de los dispositivos robóticos.

El paradigma del control basado en comportamientos (Brooks, 1986), es considerado el inicio de los robots coordinados. La generación de formaciones específicas de un grupo de robots fue luego implementada por (Yamaguchi *et al.*, 2001) bajo un esquema de control distribuido. Luego (Fierro *et al.*, 2001) propone el control de formación usando un esquema de control jerárquico. En sus aplicaciones pueden estar el seguimiento de múltiples objetivos (Kelly *et al.*, 2004) o el control de formación de 15 robots usando un algoritmo de asignación multirobots para representar letras es presentado en (Macdonald, 2011). (Fig. 1)

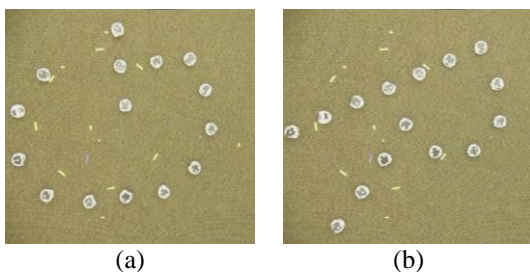


Fig. 1. Control de formación de 15 robots Khepera III (a) Letra G, (b) Letra R

En aplicaciones de exploración, la navegación de los robots móviles debe ser coordinada de esta forma se optimiza el uso de los robots y se evita concentrar muchos los robots en una sola área (Molina y Rodriguez, 2014). Para el desarrollo de sistemas multi-agentes robóticos (Vallejo *et al.*, 2018) presenta diferentes metodologías que han sido implementadas.

## 2. DESARROLLO DEL HARDWARE USADO PARA EL CONTROL DE FORMACION

El hardware del sistema de control de formación está compuesto por 2 partes: La plataforma robótica, que es el robot móvil que hará las acciones de formación y el sistema de retroalimentación, que permitirá conocer la posición y orientación de cada uno de los robots implementados.

### 2.1 Diseño de la plataforma robótica.

El diseño de la plataforma robótica se realizó bajo las siguientes consideraciones:

- El trabajo se realiza en un entorno controlado.
- La plataforma robótica se mueve sobre una superficie plana.
- La plataforma robótica, en conjunto, se comporta como un cuerpo rígido.
- Las ruedas se mueven con rodadura pura.
- Como máximo hay un eje de dirección por rueda.
- Los ejes de la dirección son perpendiculares al suelo.
- El plano de imagen es paralelo al plano de movimiento de la plataforma robótica.

Para la selección del sistema de locomoción se analizaron varios parámetros y se realizó una comparación según al grado de dificultad que tiene el robot móvil según los criterios de control, facilidad de implementación y costo entre las configuraciones tipo diferencia, síncrona, triciclo, ackerman y omnidireccional, como se observa en la Tabla 1.

*Tabla 1: Comparación de los sistemas de locomoción.*

Factor		Peso	Sistema de locomoción				
			1	2	3	4	5
			Diferencial	Sincrona	Triciclo	Ackerman	Omnidireccional
1	Imagen	V					
		C	5	5	5	5	5
		P	5	5	5	5	5
2	Control	V	Sencillo	Complejo	Medio	Medio	Complejo
		C	5	1	3	3	1
		P	25	5	15	15	5
3	Estabilidad estática	V	Buena	Óptima	Buena	Óptima	Óptima
		C	4	5	4	5	5
		P	8	10	8	10	10
4	Estabilidad dinámica	V	Aceptable	Buena	Buena	Óptima	Óptima
		C	3	4	4	5	5
		P	15	20	20	25	25
5	Mantenimiento	V	Sencillo	Elevado	Medio	Medio	Elevado
		C	5	2	4	3	2
		P	15	6	12	9	6
6	Facilidad de implementación	V	Sencillo	Complejo	Medio	Medio	Complejo
		C	5	1	3	3	1
		P	25	5	15	15	5
7	Restricciones cinemáticas	V	Holonómica	Holonómica	No holonómica	No holonómica	Holonómica
		C	5	5	3	3	5
		P	25	25	15	15	25
8	Grados de libertad sistema	V	3	3	3	3	3
		C	5	5	5	5	5
		P	25	25	25	25	25
9	Número de actuadores	V	2	3/4	2	2/4	3/4
		C	5	3	5	4	3
		P	25	15	25	20	15
10	Costo	V	Económico	Costoso	Económico	Moderado	Costoso
		C	5	2	5	4	2
		P	25	10	25	20	10
Total Ponderado			193	126	165	159	131
Prioridad según T.P.			1	5	2	3	4

\*V: Valor / C: Calificación / P: Puntaje

De esta comparación, la configuración diferencial se presenta como la más sencilla, es similar a la configuración triciclo, pero esta varía en la implementación de la rueda de soporte. Mientras que en la configuración triciclo la rueda de soporte es la rueda directriz, la cual permite la dirección deseada del robot, en la configuración diferencial la rueda libre o “rueda loca”, solo cumple la función de soporte.

La plataforma robótica es equipada con sensores (encoder, ultrasónicos), sistema de comunicación, sistema embebido, puente H y batería que fueron seleccionados después de un proceso de comparación entra las diferentes opciones del mercado. Estos elementos son especificados en la Tabla 2 así:

Tabla 1. Selección de la instrumentación

Elemento	Referencia
Encoder	magnético Pololu
Sensor	ultrasónico HC-SR04
Sistema embebido	Arduino Mega 2560
Sistema de comunicación	Módulo de radio frecuencia NRF24L01
Puente H	Módulo L298N

Batería	Batería LiPo 2200 mAh 11.1V
---------	-----------------------------

El resultado final de la plataforma robótica después de ensamblar todos sus elementos es presentado en la Fig. 2. Donde se puede apreciar el modelo en CAD y el modelo real del robot móvil.

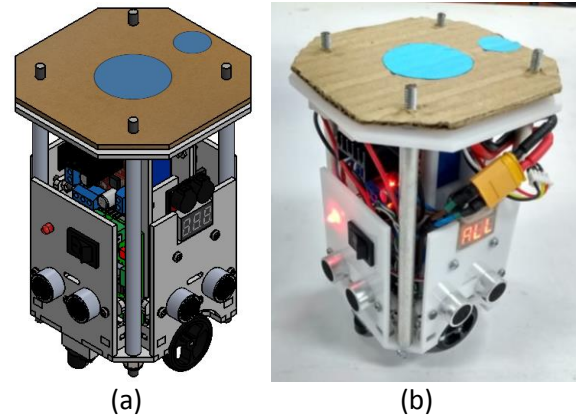


Fig. 2. Robot móvil de transmisión diferencial. (a) Modelo en CAD (b) Robot real

## 2.2 Implementación del sistema de retroalimentación.

La retroalimentación de la posición de los robots se realiza de forma visual, para tal fin fue implementada una cámara de web mediante una estructura de soporte. La delimitación del espacio de trabajo por donde se desplazan los robots móviles está dada por el campo visual de la cámara como se observa en la Fig. 3 imagen, por tal razón se determina un área de trabajo.

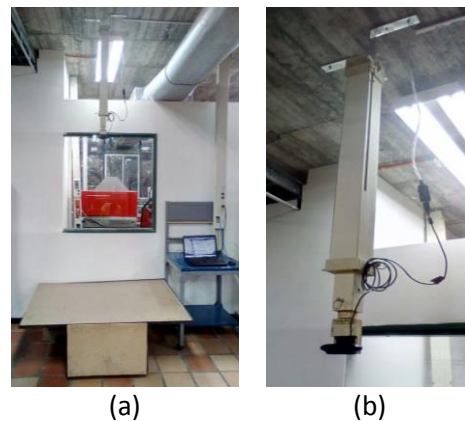


Fig. 3. Delimitación del espacio de trabajo. (a) Área de trabajo. (b) Soporte de la cámara web.

La calibración de la cámara es necesaria para determinar la distancia entre los robots y su posición, para lo cual se usa un patrón basado en

colores del cual se conoce la medida y se busca establecer las distancias entre los centroides de los colores segmentados. En la Fig. 4 se observa un ejemplo para la segmentación de color azul.

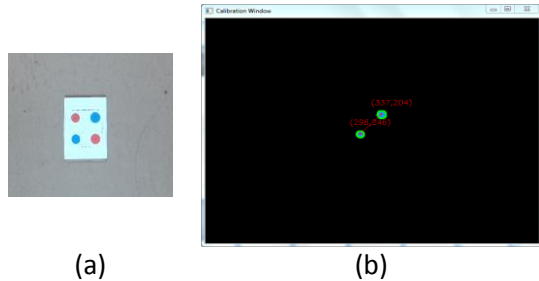


Fig. 4. Calibración de la cámara web con el color azul (a) Ubicación del patrón de calibración (b) umbralización y distancia

### 3. DISEÑO DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y POSICIÓN DEL ROBOT

#### 3.1 Control de velocidad.

El diagrama del robot móvil diferencial es presentado en Fig. 5. La posición y la orientación de este robot dependen de la velocidad angular de las ruedas izquierda y derecha.

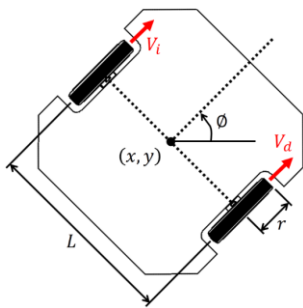


Fig. 5. Cinemática del robot diferencial

Su movimiento está determinado por la ecuación del modelo cinemático y es presentado de forma matricial en la Ecuación (1).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\omega_d + \omega_i) \cdot r \cdot \cos(\theta)}{2} \\ \frac{(\omega_d + \omega_i) \cdot r \cdot \sin(\theta)}{2} \\ \frac{(\omega_d - \omega_i) \cdot r}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dado que la velocidad angular es el parámetro más importante en el robot se diseña un control de velocidad para la rueda izquierda y derecha del robot basado en un modelo matemático de caja blanca. La función de transferencia del control de velocidad se presenta en la Ecuación 2:

$$\frac{\omega_1(s)}{PWM(s)} \Big|_{T_1(s)=0} = \frac{KK_i}{(R + Ls)(J_ms + B_m) + K_iK_v} \quad (2)$$

Donde cada una de las variables de la ecuación están definidas como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3: Nomenclatura de la función de transferencia

Símbolo	Significado
$\omega_1(s)$	Velocidad angular de la rueda
$PWM(s)$	Porcentaje de PWM
$K_i$	Constante mecánica del motor
$K_v$	Constante contraelectromotriz del motor
$R$	Resistencia de armadura del motor
$L$	Inductancia de armadura del motor
$J_m$	Inercia del motor
$B_m$	Coefficiente de fricción viscosa del motor

Dado que el controlador implementado será digital, modelo presentado en la Ecuación 2 es discretizado con un periodo de muestreo de 1ms y al reemplazar los valores de las variables se obtiene el controlador PID presentado en la Ecuación 3:

$$G_a(z) = \frac{0.09z^2 + 0.0189z - 0.0711}{z^2 - z} \quad (3)$$

Los resultados del lazo de control de velocidad diseñado son presentados para cada una de las ruedas. En ambos casos se puede observar que el seguimiento que se tiene la señal de setpoint es aceptable. En la Fig. 6 se presenta la respuesta de la rueda derecha y la acción de control ante una entrada tipo escalón

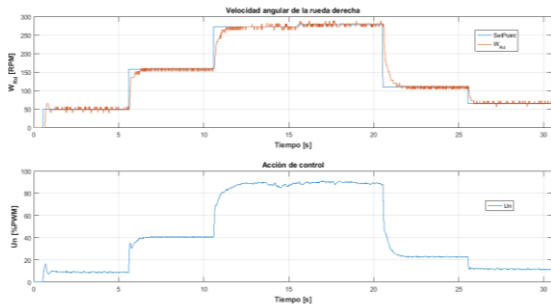


Fig. 6. Velocidad angular de la rueda derecha

En la Fig. 7 se presenta la respuesta del sistema de control de velocidad para la rueda izquierda.

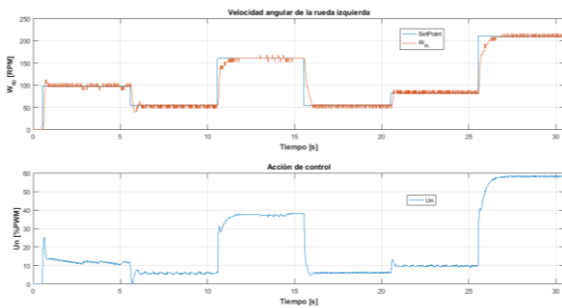


Fig. 7. Velocidad angular de la rueda izquierda.

**3.2 Selección de la estrategia de control aplicada al control de formaciones**

La estrategia de control de formación visual seleccionada se divide en dos etapas secuenciales, la asignación de los puntos objetivos y el seguimiento de la trayectoria.

**3.2.1 Asignación de puntos objetivos**

Esta etapa consiste en asignar los puntos objetivos de la formación a realizar a cada una de las plataformas robóticas operativas en el espacio de trabajo. De esta forma, se establece el punto final de la trayectoria a efectuar por cada robot. Esta asignación será invariante en el tiempo, siempre y cuando, el número de robots o el número de puntos en el espacio de trabajo sean constantes. Si hay un cambio en la cantidad de robots, incremento o decremento, al igual que con los puntos, la asignación se realizará nuevamente.

Para realizar la distribución de los puntos es necesario obtener la matriz con las distancias euclídeas entre los robots y los puntos de la formación a desarrollar como se observa en la Fig. 8.

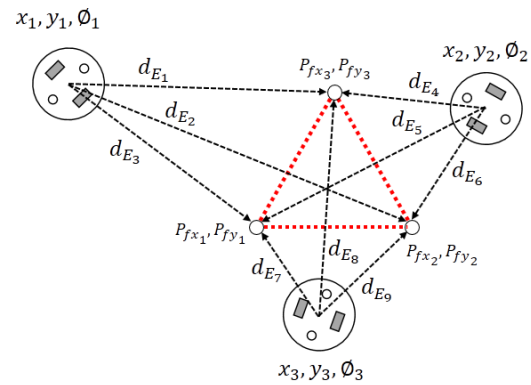


Fig. 8. Distancias euclídeas de las plataformas robóticas a los puntos objetivos de la figura geométrica

Seguidamente se debe aplicar uno de los siguientes criterios de asignación (Tabla 4) a la matriz de distancias euclídeas obtenida.

Tabla 4. Criterios de asignación

Criterio	Siglas
Robot más cercano al punto más cercano	R+C a P+C
Robot más alejado al punto más cercano	R+A a P+C
Robot más cercano al punto más alejado	R+C a P+A
Robot con la distancia más cercana a la media de las distancias mínimas de los robots al punto más cercano	R+C(DM) a P+C
Robot con la distancia más cercana a la media de las distancias mínimas de los robots al punto más alejado	R+C(DM) a P+A
Robot con la menor distancia recorrida al punto más cercano	RmDR a P+C
Robot con la menor distancia recorrida al punto más alejado	RmDR a P+A

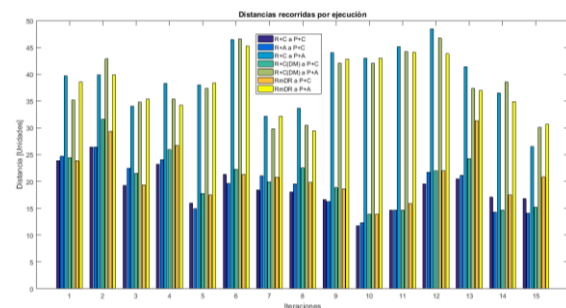


Fig. 9. Distancias recorridas por el sistema bajo el escenario PA-RA (run n.º 6)

Se puede observar que los criterios con menor distancia recorrida son aquellos en los que se asignan los puntos más cercanos, por ende, y dada

la poca diferencia (0.1%) entre los criterios con menor distancia recorrida (R+C a P+C y R+A a P+C), se escoge el R+C a P+C como criterio para esta etapa.

### 3.2.2 Seguimiento de trayectorias

En esta etapa se busca garantizar que la plataforma robótica se desplace desde una posición inicial hasta una final. Se propone una transformación al modelo del monociclo que consiste en prescindir de la orientación de la plataforma robótica añadiendo un punto imaginario al sistema a una distancia  $D_p$  del punto céntrico de la plataforma como se muestra en el Fig. 10.

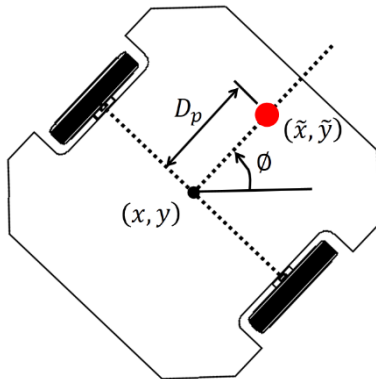


Fig. 10. Modelo cinemático adaptado

Este nuevo punto se describe geoméricamente mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + D_p \cdot \cos(\phi) \\ y + D_p \cdot \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Al derivarlas, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} - D_p \cdot \dot{\phi} \cdot \sin(\phi) \\ \dot{y} + D_p \cdot \dot{\phi} \cdot \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ahora, si se asume que se puede controlar instantáneamente ese nuevo punto, se tendrá que:

$$\begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & D_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Obj} - x_R \\ y_{Obj} - y_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde la primera matriz es una matriz de rotación,  $x_{Obj}$  es la abscisa del punto objetivo,  $x_R$  la

abscisa actual del robot,  $y_{Obj}$  la ordenada del punto objetivo,  $y_R$  la ordenada actual del robot,  $v$  y  $\omega$  la velocidad lineal y angular de la plataforma robótica respectivamente. Para hallar estas dos últimas variables, se despeja la velocidad lineal y la velocidad angular, de modo que:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\phi) & -\sin(-\phi) \\ \sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Obj} - x_R \\ y_{Obj} - y_R \end{bmatrix} \quad (7)$$

Conociendo  $v$  y  $\omega$  e igualando las  $\dot{\tilde{x}}$  y las  $\dot{\tilde{y}}$  de del modelo cinemático presentado en la Ecuación 1, se pueden hallar las velocidades angulares de la plataforma robótica:

$$\begin{aligned} \omega_d &= \frac{2v + L\omega}{2r} \\ \omega_i &= \frac{2v - L\omega}{2r} \end{aligned} \quad (8)$$

Siendo  $\omega_d$  y  $\omega_i$  los datos a enviar a la plataforma robótica para que esta se desplace del punto inicial al punto final dentro del espacio de trabajo.

## 4. RESULTADOS

La evaluación del control de formación de los robots móviles se realizará usando 6 plataformas robóticas construidas. Estos 6 robots deberán realizar 2 formaciones, una línea recta y un rectángulo.

### 4.1 Formación en línea recta

Se ubican los robots en la posición inicial y a cada uno de los robots se la asigna una posición final como se muestra en la Fig. 11.

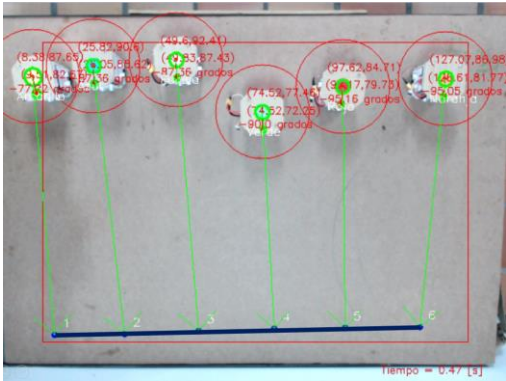


Fig.11. Línea recta. Posición inicial

Una vez se da inicio al proceso de formación los robots avanzan a los objetivos finales. En esta prueba los robots tardaron un tiempo de 40.31 s para llegar a la posición asignada. Este resultado se presenta en la Fig. 12.

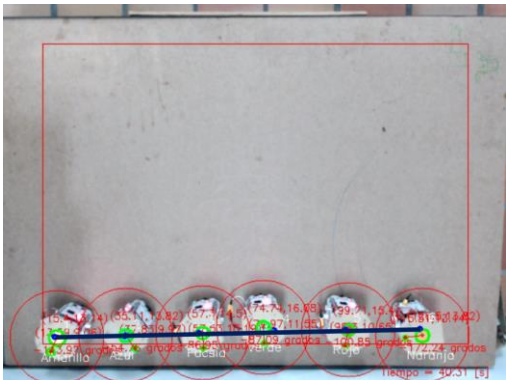


Fig. 12. Línea recta. Posición final

#### 4.1 Formación en rectángulo

Se ubican los robots en la posición inicial de la Fig. 13, donde se les asigna una posición final para ser ejecutada por el sistema de control de formación.



Fig. 13. Rectángulo. Posición inicial

El sistema de control tarda 59.46 s, para que los robots lleguen a su posición asignada como se observa en la Fig. 14.

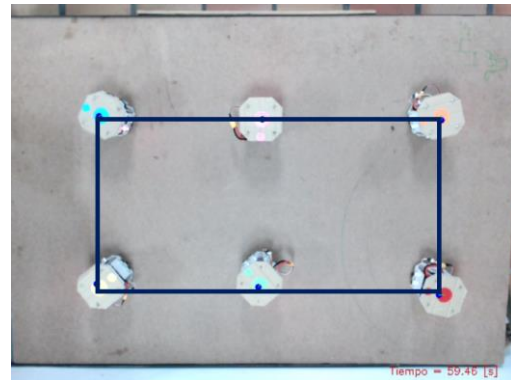


Fig.14. Rectángulo. Posición final

## 4. CONCLUSIONES

El artículo presenta los resultados obtenidos en el diseño e implementación de una plataforma robótica que permite evaluar estrategias para el control de formación y la distribución de tareas. Fueron construidos 6 robots móviles con iguales especificaciones para realizar las pruebas de formación mediante la asignación de posiciones objetivo a las cuales los robots deben ubicarse. Los resultados demuestran que un robot diferencial con control de velocidad proporcional y retroalimentación visual de la posición permite tener una acción de control que le permite a los robots llegar a la posición objetivo.

## RECONOCIMIENTO

Este proyecto es un aporte a la solución del foco Sociedad, Reto 2: Innovación social para el desarrollo económico y la inclusión productiva, temática Productividad, Producción especializada y de calidad, desarrollado en el marco del programa Colombia Científica.

## REFERENCIAS

- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2(1): 14-23, Marzo.
- Fierro R.; P. Song; A. Das; V. Kumar (2001). Cooperative control of robot formations. Kluwer Series Applied Optimization.

- Kelly, R., Carelli, R., Ibarra, J.M, Monroy, C., (2004). Control de una pandilla de robots móviles para el seguimiento de una constelación de puntos objetivo. VI congreso mexicano de robotica. VI Congreso Mexicano de Robótica.
- Macdonald, Edward. (2011). Multi-Robot Assignment And Formation Control. Tesis de Maestria. Georgia Institute of Technology.
- Molina, Manuel y Rodríguez, Edgar. (2014) Flotilla de robots para trabajos en robótica cooperativa. Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada.
- Martinez, John y Vallejo, Margarita. (2018). Comparación de estrategias de navegación colaborativa para robótica móvil.
- Yamaguchi H.; T. Arai; G. Beni (2001). A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. Robotics and Autonomous Systems, 36, pp. 125-147