

## Sistema electrónico de bajo costo para la detección de un haz de luz

Fabiola López Tenorio<sup>1</sup>, Martin Jr. Bedolla Pantoja<sup>1</sup>, Miguel Ángel López Zavala<sup>1</sup>, Emmanuel Núñez Guerra<sup>1</sup>, Carlos Rodríguez Doñate<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías de Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato  
f.lopeztenorio@ugto.mx, mj.bedollapantoja@ugto.mx, ma.lopez.zavala@ugto.mx, e.nunezguerra@ugto.mx, c.rodriguezdonate@ugto.mx

### Resumen

Hoy en día la detección de luz se puede ver en gran variedad de aplicaciones de uso cotidiano, industriales, medicina entre muchas más. No obstante, la mayoría de los sistemas utilizados para este fin suelen tener un elevado costo ya sea por el tipo de sensor que se esté utilizado, la plataforma de desarrollo donde se implementará, entre otros factores. En este trabajo se propone un sistema de bajo costo para realizar la detección y seguimiento de un haz de luz, donde se utilizará como sensor un arreglo de fotorresistencias que permitirá indicar la posición del haz de luz en base a un sistema cartesiano. La solución propuesta se realiza mediante dos métodos que tienen como base cálculos de geometría analítica lo cual requiere de baja demanda de recursos computacionales, para poderlo llevar a su implementación en tiempo real.

**Palabras clave:** haz de luz; teorema de Pitágoras; circunferencias secantes; fotorresistencia;

### 1. Introducción

En la actualidad la detección de luz es un área de suma relevancia que se puede ver en gran variedad de aplicaciones como comunicaciones ópticas, sensado óptico, robótica, visión por computador entre otras [1-5]. Lo cual se ha realizado mediante diferentes tipos de sensores como arreglo de fototransistores, fotodiodo, fotorresistencia, entre otros más. No obstante, el uso de estos dependerá del tipo de aplicación en el cual se utilizará.

En este trabajo se propone un sistema de bajo costo para realizar el seguimiento de un haz de luz, donde se parte de un arreglo de sensores bajo un esquema cartesiano; por lo tanto, se diseñó una etapa de instrumentación, adquisición, caracterización y procesamiento de señales. Se destaca la etapa de procesamiento se realizó bajo dos principios de operación teniendo como finalidad identificar el haz de luz en base a un plano cartesiano.

### 2. Método

#### 2.1 Descripción del problema

El objetivo principal de este trabajo es realizar la detección y seguimiento de un haz de luz; por lo tanto, el sistema diseñado debe de ser capaz de indicar la distancia a la cual se encuentra ubicado el haz de luz tomando como base un marco de referencia cartesiano. Para esto se utilizó el arreglo de fotorresistencias que se muestra en la Fig. 1, el cual permite identificar el haz de luz dependiendo el cuadrante en el cual se encuentre ubicado, donde el rango de detección es indicado por el contorno punteado. Como referencia del plano cartesiano se debe de tomar el sensor  $y_2$  y los sensores  $y_1$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  y  $y_5$ . De esta forma se logrará ubicar el cuadrante en el cual se encuentra ubicado el haz. Como referencia, la distancia  $x$  que se muestran en la figura 1 se encuentra ubicada entre el centro de los sensores tomando como referencia el sensor  $y_2$ , y la distancia  $y$  indica la separación entre los sensores de los extremos.

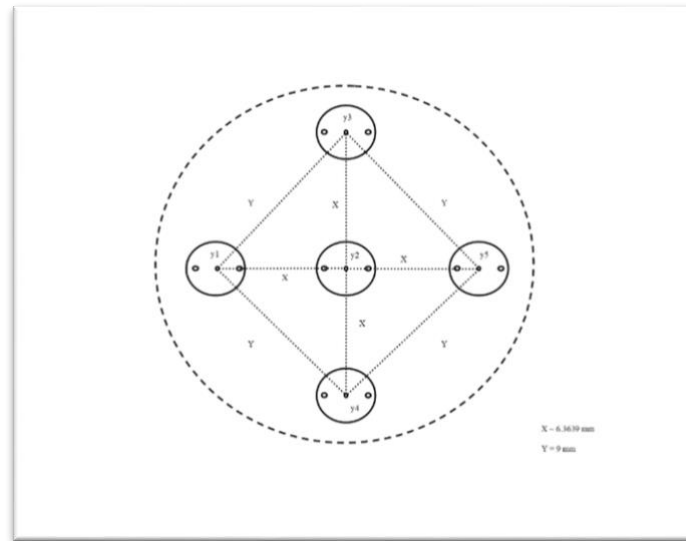


Figura 1. Arreglo de sensores que define el plano cartesiano para la detección del haz de luz

## 2.2 Metodología

En base al plano cartesiano que se definió con el arreglo de sensores, el diagrama general de la metodología propuesta se muestra en la Fig. 2., la cual consiste en el diseño del arreglo de sensores, instrumentación de las señales, adquisición y transferencia de señales hacia la computadora, donde se realiza la caracterización de las señales y el algoritmo de detección y seguimiento del haz de luz.

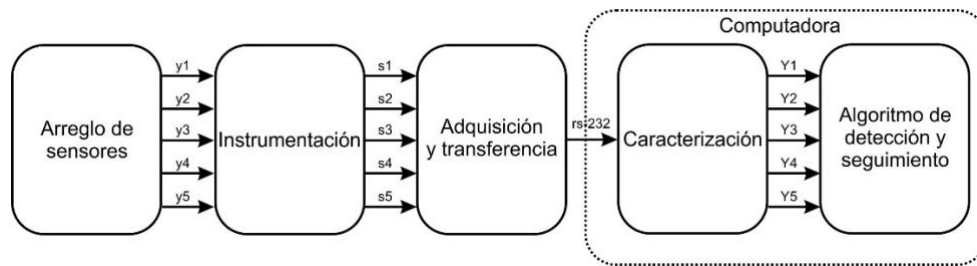


Figura 2. Diagrama general de la metodología propuesta

Como se muestra en la figura la primera etapa de la propuesta consiste en el diseño e implementación del arreglo de sensores el cual tiene como base las especificaciones que se describen la Fig. 1, por lo tanto, esta etapa envía la señal analógica de cada uno de los sensores a la etapa de instrumentación, la cual se indica en la Fig. 2 como  $y1$ ,  $y2$ ,  $y3$ ,  $y4$  y  $y5$ . A partir de estas señales se diseñó la etapa de instrumentación para que las salidas  $s1$ ,  $s2$ ,  $s3$ ,  $s4$  y  $s5$  pueda proporcionar un voltaje variable de 0 volts a 5 volts. El diagrama general del diseño de esta etapa para un sensor se muestra en la Fig. 3, este diseño se replicó por cada uno de los sensores del arreglo cartesiano.

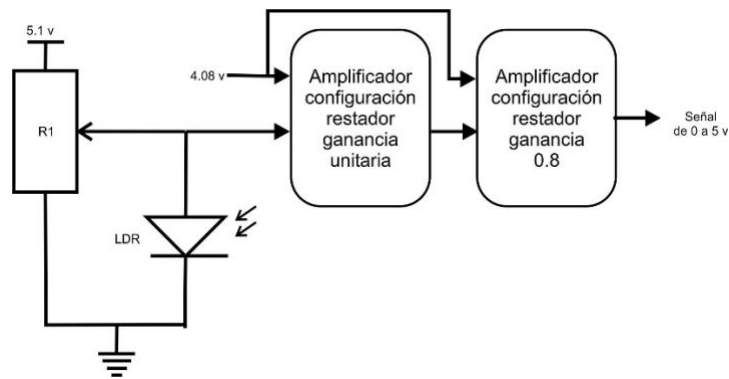


Figura 3. Etapa de acondicionamiento de un sensor

El amplificador operacional utilizado fue el TL084 y se alimentaron con +10 v y -10 v, en esta etapa los voltajes de 5.1 v y 4.08 v se diseñaron mediante una etapa de amplificadores. Con el primer voltaje se alimenta el arreglo entre el potenciómetro de 1 k ohms (R1) y la fotorresistencia; por lo tanto, cuando incide la luz en el sensor el voltaje que se envía a la etapa de amplificación se reduce y cuando no hay luz el voltaje aumenta. El segundo voltaje sirve para realizar un ajuste de la señal entre valores de 0 v a 4.0 v esto con la finalidad de poder enviar esta señal a la etapa de adquisición ya que el convertidor analógico digital puede recibir señales de 0 a 5 volts. Otro uso que tiene el potenciómetro es poder realizar el ajuste a los voltajes deseados si las condiciones de iluminación cambian lo que permite tener mejor control en las siguientes etapas.

La etapa de adquisición se realizó con la tarjeta de Arduino UNO ya que cuenta con entradas analógicas, en las cuales se conectaron las señales *s1*, *s2*, *s3*, *s4* y *s5* que provienen de la etapa de instrumentación, esta tarjeta solo se utilizó para realizar la conversión de la señal analógica a digital por cada sensor y como medio para transferir los datos hacia el software Matlab mediante el protocolo serial RS-232. De esta forma se realizó la caracterización de cada uno de los sensores utilizando un láser comercial de bajo costo, la distancia aproximada entre el arreglo de sensores y el láser fue entre 100 cm y 50 cm, donde se observó que no se tenía variaciones si se realizaban las mediciones que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Mediciones realizadas con el sensor y1

Descripción	Distancia	Voltaje
Láser apagado	Mayor a 6.5 mm	4.06 V
	6.5 mm	4.05 V
La distancia del haz de luz es respecto al borde de la fotorresistencia	3.5 mm	4.04 V
	2.0 mm	4.02 V
	0.5 mm	4.00 V
La distancia del haz de luz es respecto al centro de la fotorresistencia	2.5 mm	3.50 V
	2.0 mm	2.71 V
	0.0 mm	2.12 V

A partir de esta información y para restringir las variables del problema se definió que la distancia máxima para cada sensor fue de 6.5 milímetros con un voltaje de 4.06 v y como límite se tomó el borde de la fotorresistencia teniendo un voltaje aproximado de 3.5 v, adicionalmente se asumió que el comportamiento del sensor en estos rangos tenía una distribución lineal de voltaje por distancia. Adicionalmente, se detectó variación de voltaje en el borde de cada fotorresistencia por lo cual la caracterización se aproximó a funciones polinomiales de distinto orden, lo cual se realizó con la herramienta Curve Fitting de Matlab y se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Funciones polinomiales de aproximación para estimar la distancia respecto al voltaje del sensor, donde  $x_1, x_2, x_3, x_4$  y  $x_5$ , indican la medición actual del sensor.

Sensor	Función de aproximación
y1	$Y1 = 0.57844x_1^3 + 1.917x_1^2 + 1.9486x_1 + 3.311$
y2	$Y2 = 0.17069x_2^4 + 1.1041x_2^3 + 2.2144x_2^2 + 1.6372x_2 + 3.325$
y3	$Y3 = 0.97206x_3^3 + 2.3576x_3^2 + 1.2217x_3 + 3.195$
y4	$Y4 = 0.087955x_4^3 + 0.66768x_4^2 + 1.6268x_4 + 3.7672$
y5	$Y5 = 0.508661x_5^4 + 0.82091x_5^3 - 0.27908x_5^2 + 0.51415x_5 + 4.1031$

La última etapa de la propuesta de la metodología que corresponde al algoritmo de detección y seguimiento del haz de luz se realizó mediante dos métodos los cuales se describen a continuación.

#### Método 1: fundamentación y resultados

Para este método se asume que cada sensor es puntual lo que implica que la detección del sensor se da de forma circular y que el alcance de detección se da hasta el próximo sensor. Por lo tanto, el haz de luz podrá detectar 1 o más sensores; sin embargo, solo si dos sensores o más detectan el haz de luz si se podrá determinar la posición. El principio teórico utilizado para este primer método es el teorema de las circunferencias secantes ya que estas poseen dos puntos en común los cuales serían la posición real, y una hipoteca. La manera de determinar cuál de ambas es la verdadera se tienen las siguientes dos opciones:

- Comparando con un tercer sensor y determinando el punto en común.
- Usar un sensor de referencia el cual si está siendo utilizado será las coordenadas de magnitud más pequeña y de caso contrario las de magnitud mayor.

De acuerdo con esto y como se muestra en la Fig. 1. Se tiene un sensor central y uno a cada lado de sus extremos (arriba, abajo, derecha e izquierda). Cada uno de estos está alejado a la misma distancia del sensor central y a la misma distancia entre sí. Estos sensores se acomodarán de menor al mayor para saber a qué vectores están más cerca. Utilizando la fórmula para circunferencias secantes primero se determina la fórmula del radio de cada sensor quedando como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Fórmula de circunferencia secante por cada sensor.

Sensor	Función de aproximación
y1	$x^2 + y^2 - 2yk + k^2 = r_1^2; k = 6.3639$
y2	$x^2 + y^2 = r_2^2$
y3	$x^2 - 2xh + h^2 + y^2 = r_1^2; h = 6.3939$
y4	$x^2 + y^2 - 2yk + k^2 = r_1^2; k = 6.3939$
y5	$x^2 - 2xh + h^2 + y^2 = r_1^2; k = 6.3939$

A partir de la información de esta tabla, se determina la fórmula de las circunferencias de donde se obtienen las coordenadas X y Y. Al tener definido que el sensor central siempre será y2, solo se utilizarán los dos sensores más próximos al haz de luz, para el sensor y1 y y5, sus coordenadas quedarán definidas de la siguiente manera:

$$\left( \mp \sqrt{\frac{r_1^4 + 2r_1^2 r_2^2 + r_2^4 - 4k^2 r_1^2}{4k^2}}, \frac{r_1^2 - r_2^2}{2k} \right) \quad (1)$$

Donde se usará el signo negativo si  $Y3 < Y4$  y positivo si  $Y4 < Y3$ . Para el sensor Y4 y Y3, las coordenadas quedaran definidas por la ecuación (2)

$$\left( \frac{r_1^2 - r_2^2}{2h}, \mp \sqrt{\frac{r_1^4 + 2r_1^2 r_2^2 + r_2^4 - 4h^2 r_1^2}{4h^2}} \right) \quad (2)$$

Donde se usará el signo negativo si  $Y1 < Y5$  y positivo si  $Y5 < Y1$ . Ahora si uno de los dos sensores más próximos no es el sensor central se analizará también el tercer sensor más próximo y si su distancia no es mayor a 8.6 mm entonces las coordenadas serían las menores, en cambio si fuera así serían las más grandes y se finirían por la siguiente ecuación.

$$-\left(-2h + \frac{r1^2 h}{k^2} - \frac{r2^2 h}{k^2}\right) \pm \sqrt{\left(-2h + \frac{r1^2 h}{k^2} - \frac{r2^2 h}{k^2}\right)^2 - 4\left(1 + \frac{h^2}{k^2}\right) \frac{(r1^4 - 2r1^2 r2^2 - r2^4)}{4k^2}}}{2\left(1 + \frac{h^2}{k^2}\right)}, \frac{r1^2 - r2^2 + 2xk}{2k} \quad (3)$$

Finalmente, y a partir de las ecuaciones que se definieron el diagrama de flujo para este primer método se muestra en la figura 4, el cual fue implementado en Matlab. Y tiene como entrada la información que proporciona cada una de las ecuaciones polinomiales de la tabla 2.

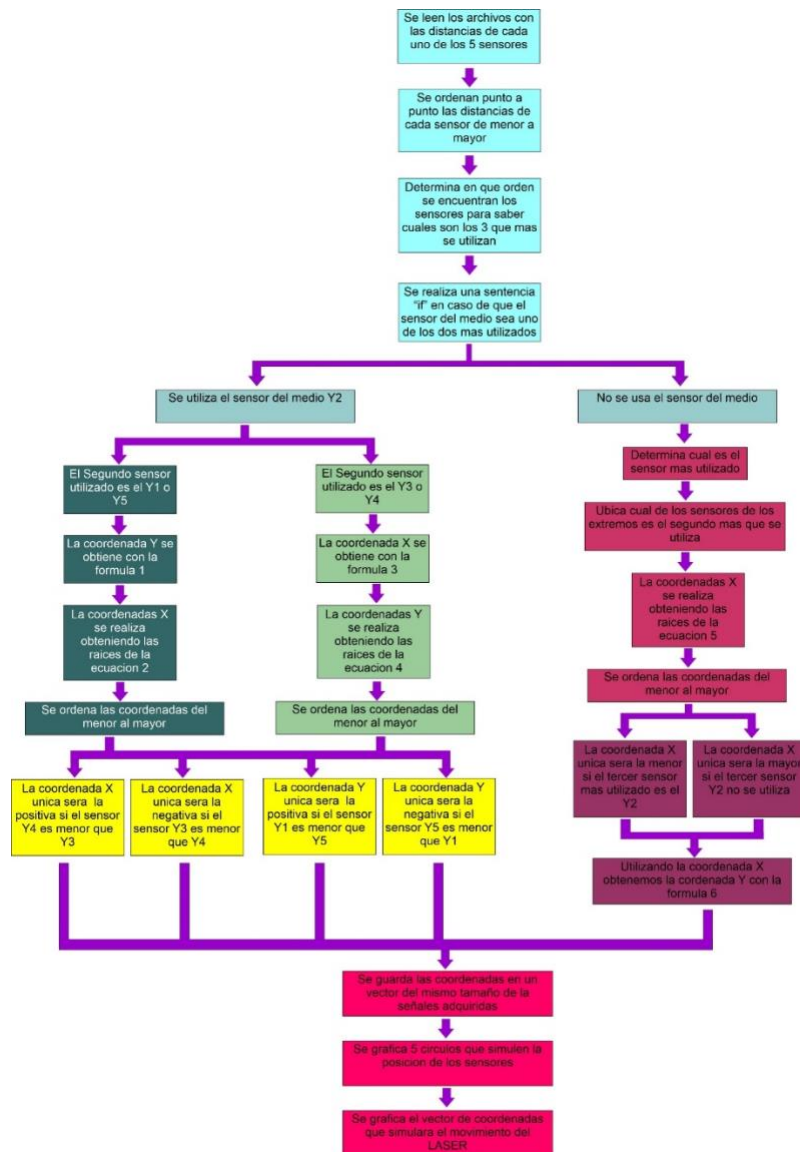


Figura 4. método 1 para la detección y seguimiento del haz de luz

Como resultado de este método se muestra la Fig. 5. Donde se puede observar el movimiento del haz de luz sobre el arreglo de sensores. Cada uno de los sensores esta indicado con un cirulo amarillo, los puntos en color rosa indican la posición del haz de luz estimada a partir de las mediciones de cada sensor y el algoritmo propuesto con el método 1. La línea roja indica el seguimiento que tuvo el haz de luz en el arreglo de sensores.

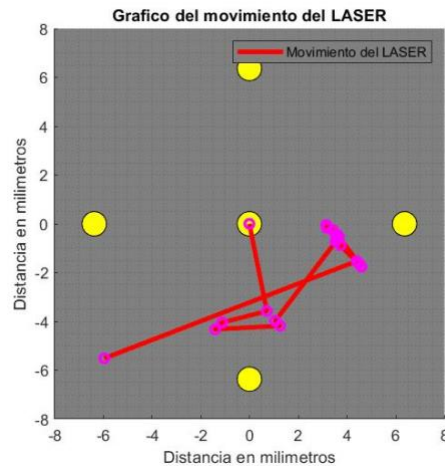


Figura 5. Seguimiento del haz de luz con el método 1

### Método 2: fundamentación y resultados

El segundo método para la detección de un haz de luz se basa en encontrar la distancia entre dos puntos de un plano cartesiano cuando uno de ellos está ubicado en el centro de uno de los sensores y el otro corresponde a un punto en una circunferencia formada a través de la magnitud leída por otro sensor que haya detectado el haz (radio) y el centro de dicho sensor. El método desarrollado plantea el problema en un espacio bidimensional mismo que resulta practico de mostrar mediante un plano cartesiano el cual no es más que un espacio vectorial de dos dimensiones dividido por dos ejes [6]. Una vez definido el espacio, el núcleo del problema es encontrar la distancia entre dos puntos situados en el plano, es decir, la longitud del espacio que separa dos coordenadas. Para esto, se utiliza la representación del teorema de Pitágoras que queda descrita bajo la siguiente formula [7].

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

El último factor a considerar es la formación de la circunferencia en el plano cartesiano que ayudará a realizar la comparación entre el punto central de uno de los sensores que detecto el haz y el sensor que, mediante la longitud leída, formará una circunferencia de radio igual a la magnitud. Si se conoce el radio y el centro de la circunferencia, es posible formar la ecuación ordinaria de esta como se muestra a continuación [8].

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2 \quad (5)$$

En la Fig. 6 se muestra el diagrama de flujo representativo del método 2 para la detección de un haz de luz. En el se observa el procedimiento a seguir una vez que se adquieren las señales leídas por los sensores.



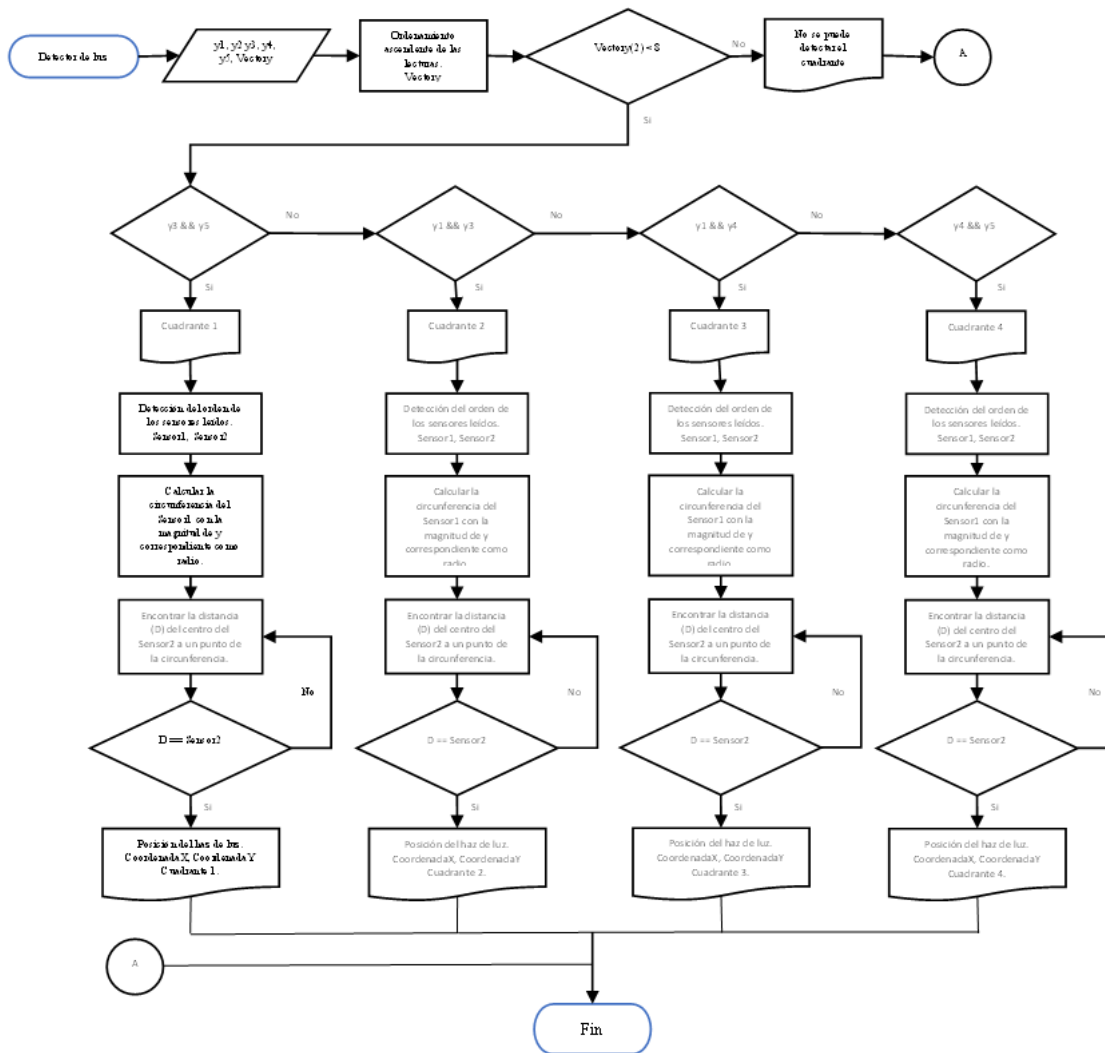


Figura 6. Diagrama de flujo del método 2

El primer paso consiste en realizar el ordenamiento ascendente muestra por muestra de cada sensor. El objetivo en este paso es generar un vector del cual se pueda distinguir cuantos y cuales sensores interfieren en la medición del haz de luz. Obtenida esta información, se procede a determinar el cuadrante en el cual se posiciona el haz. Esto es fundamental para delimitar el rango de búsqueda de la posición del haz que se realiza más adelante. Una vez que se conoce el cuadrante, es necesario conocer a que sensor corresponde cada una de las medidas ordenadas anteriormente. El propósito de esto es saber que sensor será útil para generar la circunferencia, utilizando la magnitud leída como radio, y cuál de ellos servirá para comparar la distancia de su centro a la circunferencia con la magnitud leída y, con base en esto, encontrar la posición del haz de luz. Una vez calculadas las coordenadas que componen la circunferencia del primer sensor, se calcula la distancia entre estas y el centro del segundo sensor y se realiza la comparación con la distancia leída, en caso de que los valores sean iguales, se habrá encontrado el vector y la posición a la que corresponde la medición adquirida.

En la Fig. 7 se muestra una prueba del método 2 utilizando una muestra. Se puede observar cómo ambos haces de luz (A y B) fueron detectados en el cuadrante 2 pero en distintas posiciones. En la simulación del inciso A se muestra el ejemplo cuando el sensor central detecta el haz de luz, en ese caso, se utilizará el sensor central para formar la circunferencia y el sensor cuya magnitud haya sido la más corta para realizar las comparaciones. Por otra parte, el inciso B muestra el caso cuando el sensor del centro no detecta el haz de luz y, por ende, es necesario tomar los dos sensores ubicados en el cuadrante detectado, uno de ellos será utilizado para realizar la circunferencia mientras que el otro servirá para las comparaciones.

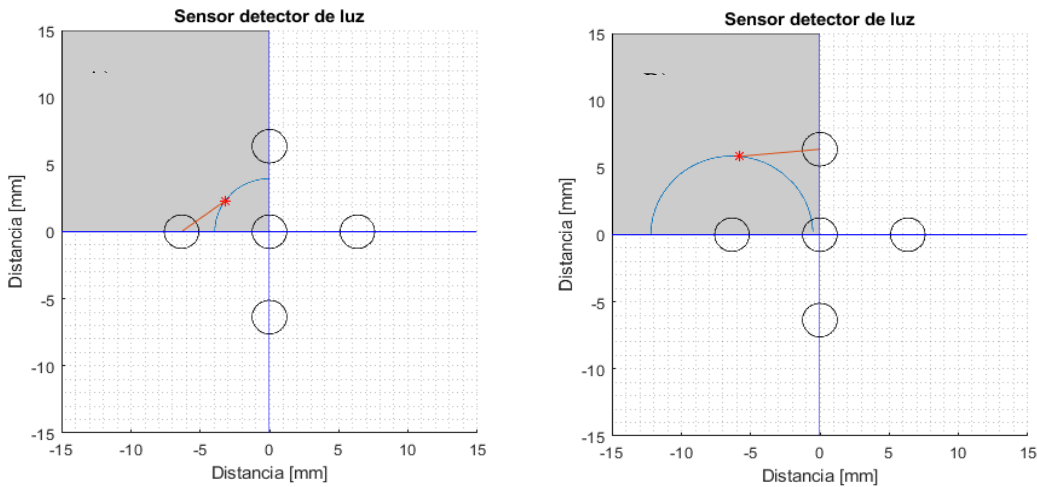


Figura 7. Simulación de un haz de luz. A) Caso cuando el sensor central detecta el haz. B) Caso cuando únicamente los sensores exteriores detectan el haz.

La Fig. 8 muestra la simulación de una señal adquirida por los sensores del sistema al realizarse un desplazamiento vertical ascendente en la línea central con un haz de luz. Se muestra el posicionamiento de un total de 90 muestras sobre el sensor inferior. En la figura, es posible apreciarse el desplazamiento realizado de forma vertical ascendente con el haz de luz dentro del tercer y cuarto cuadrante, obteniendo lecturas tanto del sensor central como de los laterales.

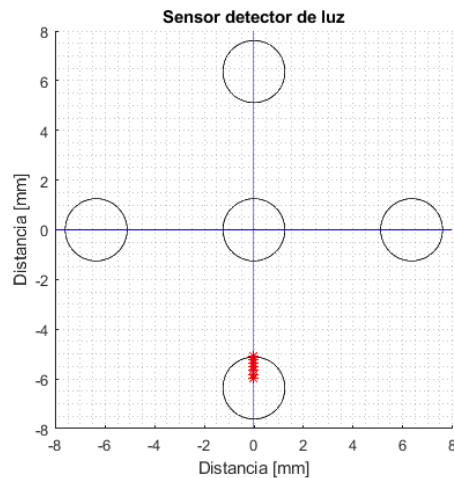


Figura 8. Funcionamiento del método 2 para la detección de un haz de luz utilizando una señal de prueba



### 3. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un sistema de bajo costo para la detección de un haz de luz, donde se utilizó como sensor un arreglo de 5 fotorresistencia, una tarjeta Arduino para adquisición y transmisión de información hacia el software Matlab, además para lograr la detección del haz de luz se propusieron dos métodos que tienen como base cálculos de geometría analítica. De esta forma y comparados con otra propuesta el computo que se requiere es de baja demanda computacionales comparado con los métodos donde se utilizan redes neuronales, lógica difusa, entre otras, también se puede destacar que el uso de fotorresistencia permite que el costo del sistema sea bajo comparado con las propuestas donde utilizan cámaras. Finalmente, y como trabajo futuro se pretende sustituir la tarjeta de Arduino por un dispositivo de lógica programable para poder realizar una detección y seguimiento del haz de luz en tiempo real.

### Bibliografía/Referencias

- [1] Zhang, Y., Zhao, Z., & Zhao, C. Vehicle High Beam Light Detection Based on Zoom Binocular Camera and Light Sensor Array. In 2021 6th IEEE International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC) (pp. 176-180). 2021.
- [2] Lee, J., Shin, D., Jang, B., Byun, H., Lee, C., Shin, C., ... & Choo, H. Single-chip beam scanner with integrated light source for real-time light detection and ranging. In 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (pp. 7-2). 2020
- [3] Zhang, Q., Pang, C., Yang, L., Li, Z., Huang, H., & Wu, G. Parallel Coded Optical Vortex Beam Free-Space Communication Based on Single-Photon Detection. *IEEE Photonics Journal*, 14(3), 1-6, 2022
- [4] Koonen, T., Mekonnen, K. A., Cao, Z., Huijskens, F., Pham, N. Q., & Tangdiongga, E. Beam-Steered optical wireless communication for industry 4.0. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(6), 1-10, 2021
- [5] Shi, J., Wei, D., Hu, C., Chen, M., Liu, K., Luo, J., & Zhang, X. Robust light beam diffractive shaping based on a kind of compact all-optical neural network. *Optics Express*, 29(5), 7084-7099, 2021
- [6] D. Cheuquepán, J. Barbé-Farré, Propuesta didáctica para las traslaciones en el plano cartesiano con el uso de planilla de cálculo. *Dinamización matemática*, 29, 131-154, 2012
- [7] E. Valencia-Calzadilla, Distancia entre dos puntos, sus dificultades por escala errónea y su aplicación en el teorema de Pitágoras. *Journal de Objetos y Objetivos Matemáticos*, 3, 17-19, 2020
- [8] J. J. Virgo-Romero, Ecuación de la circunferencia, aplicación práctica. Trabajo de Suficiencia Profesional, Facultad de educación y ciencias de la comunicación, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2018