

# CARRITO SEGUIDOR DE LÍNEA IMPLEMENTANDO LÓGICA DIFUSA

Alvarado Lagunes María José <sup>1</sup>, Fuantos Díaz Jorge Eduardo <sup>2</sup>, Hidalgo Rodríguez Melissa <sup>3</sup>

Departamento de Sistemas Electrónicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad # 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20100, Aguascalientes, Ags. México

{al331869 <sup>1</sup>, al19 <sup>2</sup>, al262931 <sup>3</sup>} [@edu.uaa.mx](mailto:@edu.uaa.mx)

**Resumen:** En el presente reporte se presenta el procedimiento detallado para la implementación y construcción de un carrito seguidor de línea utilizando lógica difusa como su principio de programación. El desarrollo del proyecto incluye la construcción del carrito mediante modelado 3D, y el diseño y la conexión de los componentes eléctricos necesarios para operar correctamente. Para el control del carrito, se emplearon funciones de membresía que permitieron definir los estados de entrada y salida del sistema. También, se establecieron reglas de inferencia para determinar la lógica de control, tomando a consideración las entradas de los sensores. Además, se describen las diferentes pruebas realizadas para la calibración del sistema, así como los desafíos encontrados durante el desarrollo y las soluciones propuestas para la optimización del carrito.

**Palabras Clave:** Calibración, Control, Lógica Difusa, Reglas

## 1 Introducción

Los inicios de la lógica difusa se sitúan en la década de 1960 cuando el matemático e ingeniero Lotfi A. Zadeh formuló esta teoría para abordar problemas que involucraran incertidumbre y subjetividad al permitir valores continuos en un rango entre 0 y 1. La lógica difusa en el carrito seguidor de línea permite tomar decisiones basadas en la intensidad en la que se detecta la línea y así modificar la velocidad de los motores para conservar su rumbo. Si bien la lógica difusa es la parte primordial en el control del carrito seguidor de línea, para el desarrollo del carrito se analizaron otros aspectos importantes como la mecánica, la electrónica y la estructura física del carrito.

## 2 Métodos

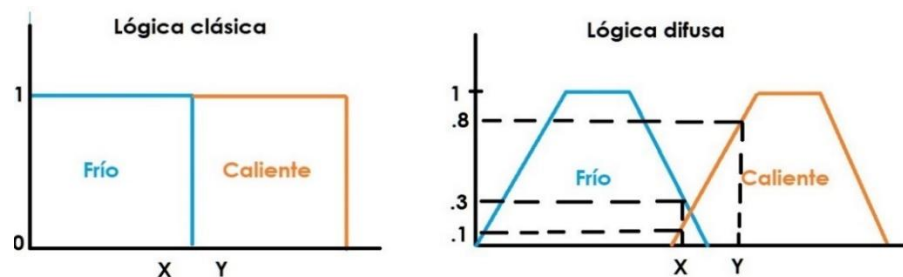
La metodología empleada contempla los conceptos y el desarrollo de las actividades siguientes:

### 2.1 Marco Teórico

Para el diseño del carrito seguidor de línea se toman las aportaciones teóricas de diversos autores en las áreas del conocimiento que se mencionan a continuación:

**Lógica Difusa:** Es una extensión de la lógica clásica que permite manejar conceptos con grados intermedios en lugar de valores booleanos (falso y verdadero). Es comúnmente utilizada para modelar la imprecisión o incertidumbre en diversas aplicaciones, como sistemas de control, inteligencia artificial o toma de decisiones.

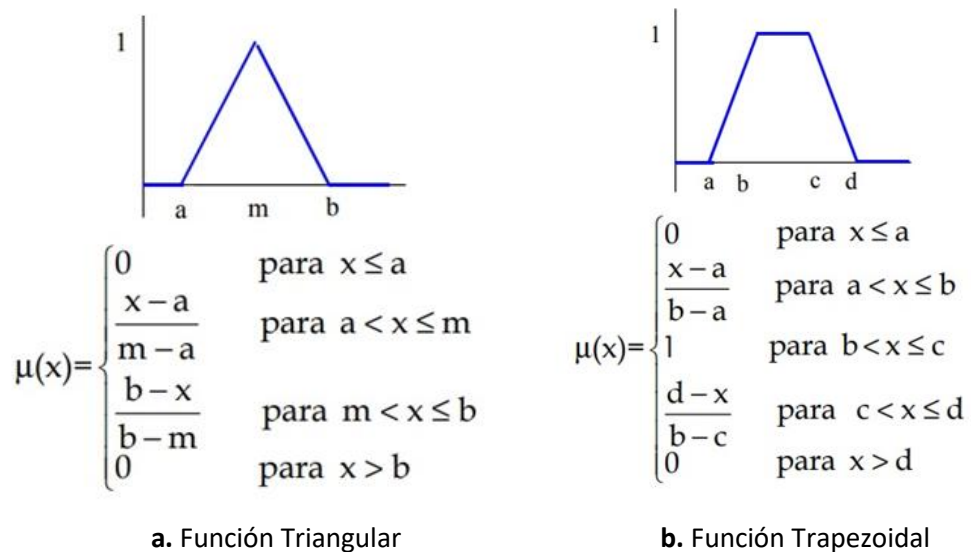
En lugar de trabajar con valores binarios, a lógica difusa está enfocada en representar las variables con grados de pertenencia que varían entre 0 y 1, siendo útil en situaciones donde la información puede ser más ambigua o imprecisa, lo que permite una aproximación más cercana a como se procesa y se maneja normalmente.



**Fig. 1.** Comparación entre la Lógica Clásica y Lógica Difusa

Las aplicaciones de este tipo de lógica abarcan desde el control de diferentes procesos industriales, ingeniería robótica, y la inteligencia artificial. [1]

Existen diferentes tipos de conjuntos difusos que pueden ser utilizados para el modelaje de los fenómenos a representar, sin embargo, existen algunos de estos que son más comúnmente utilizados, debido a su facilidad de computación. Entre los conjuntos, o funciones, más utilizados se encuentran las mostradas en al Fig. 2.



**Fig. 2.** Funciones de Pertenencia

En base a estos conceptos, los pasos para el control difuso se enlistan a continuación:

1. **Fuzzificación:** Los valores de entrada se transforman en conceptos lingüísticos difusos mediante las funciones de pertenencia.
2. **Inferencia:** En esta etapa se enlazan las cantidades difusas a través de reglas lógicas utilizando operadores lógicos como OR, AND y NOT
3. **Defuzzificación:** Se convierten las salidas difusas en valores numéricos. Esto implica encontrar valores representativos para la salida, generalmente se emplea el centroide de la función de membresía. [2]

**Sensores de línea:** Los sensores de línea son dispositivos que consisten en un LED emisor de luz infrarroja y un fototransistor receptor, El LED emite una luz infrarroja que es reflejada por las superficies cercanas. Dependiendo del color y las propiedades de la superficie, la cantidad de luz reflejada varía, siguiendo este principio, se pueden producir diferentes tipos de respuesta en forma de señal, lo que es útil para la implementación de programas, según se requiera.

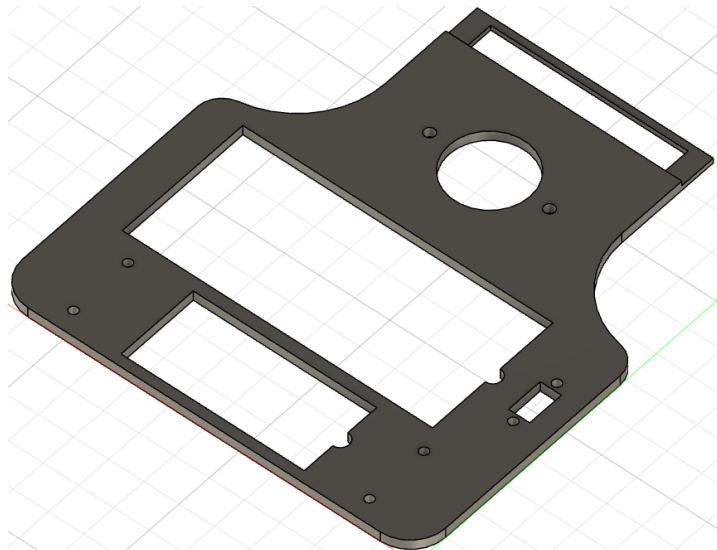


**Fig. 3.** Sensores infrarrojos

## 2.2 Construcción del Carrito Seguidor de Línea

Lo primero que se realizó fue un sondeo de los materiales posibles con los que se podía realizar el carrito seguidor, la selección de los materiales utilizados se basó en su tamaño y peso, puesto que son factores primordiales para la eficiencia del carrito.

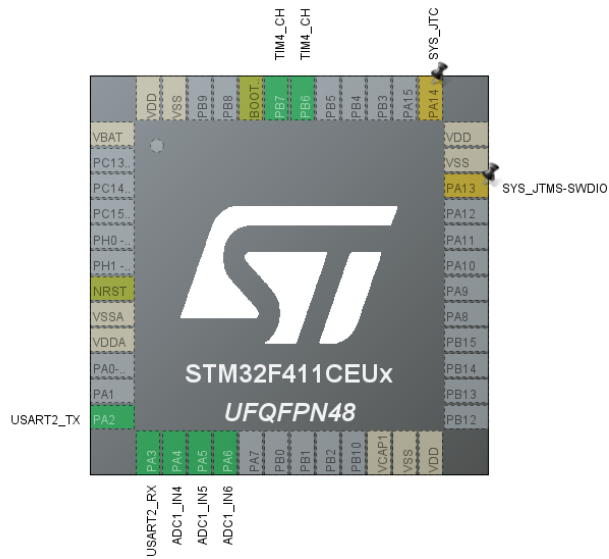
Para la estructura del carrito seguidor de línea se tomaron mediciones de cada uno de los componentes que se montaría en la base, y se diseñó la misma de manera que se tuviese una buena distribución del peso, intentando mantener ligera la parte del frente. Se buscó tener dimensiones similares para el ancho y el largo, para así lograr una forma lo más cuadrada posible con el fin de tener un mejor control en las vueltas cerradas. La base de la Fig. 4 se imprimió en una impresora 3D con material PLA.



**Fig. 4.** Base del carrito

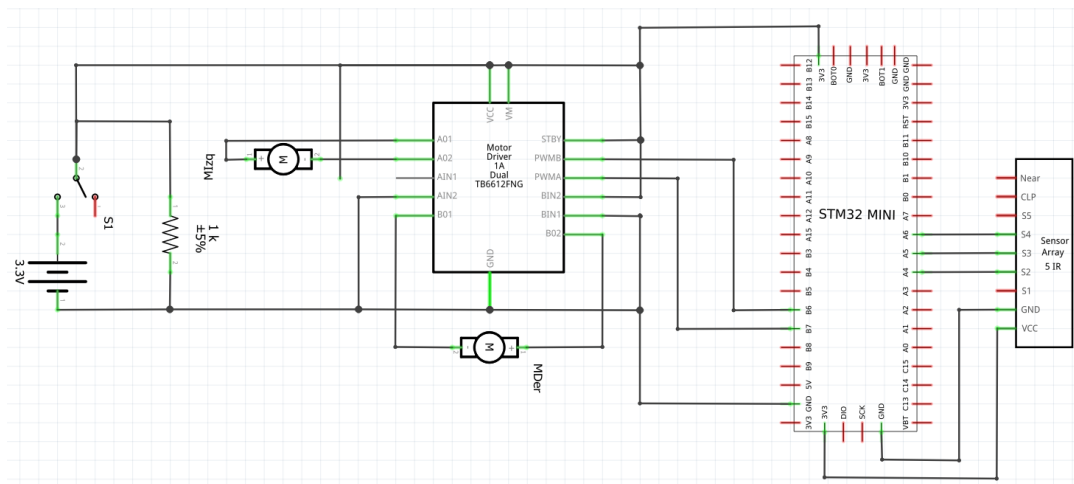
Para el control se implementó la placa de desarrollo Blackpill con el microcontrolador STM32F411, en donde para el control de los motores se configuró el TIM4 a 10 kHz y se habilitaron los canales 1 y 2 como PWM. Para la lectura de los sensores infrarrojos se habilitaron los canales 4, 5 y 6 del ADC1 y se habilitó el DMA para almacenar la lectura

de los 3 canales. Además, se habilitó el USART1 para capturar los valores del ADC y formar las funciones de pertenencia (Fig. 5).



**Fig. 5.** Configuraciones de la Blackpill

Finalmente, se conectaron los componentes como se muestra en la Fig. 6, integrando el módulo TB6612FNG para el control de los motores y dos baterías AAA para alimentar el circuito, junto con un switch de encendido y apagado.



**Fig. 6.** Conexiones del Carrito

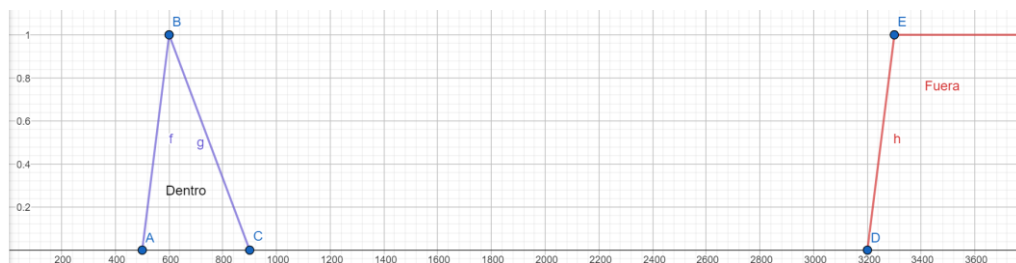
## 2.3 Diseño del Control Difuso

### 2.3.1 Fuzzificación

Para el control difuso se comenzó por realizar las mediciones mostradas en la Tabla 1, en base a estos resultados se estableció que la función de pertenencia para cada uno de los sensores es la que se muestra en la Figura 7.

**Tabla 1.** Muestreo de datos

Posición			Sensor Izquierdo	Sensor Centro	Sensor Derecho
○	●	○	3420	560	3420
○	●	○	3436	750	3442
○	●	○	4240	760	3440
●	○	○	580	3440	3440
●	○	○	660	3450	3450
●	○	○	670	3430	3430
○	○	●	3465	3380	580
○	○	●	3380	3460	577
○	○	●	3460	3445	579



**Fig. 7.** Funciones de Pertenencia Sensores

### 2.3.2 Inferencia

Nótese que no hay casos en los que dos o más sensores tomen lectura de la línea, por lo que para las reglas difusas para determinar la velocidad de cada motor se simplificaron como se muestra a continuación:

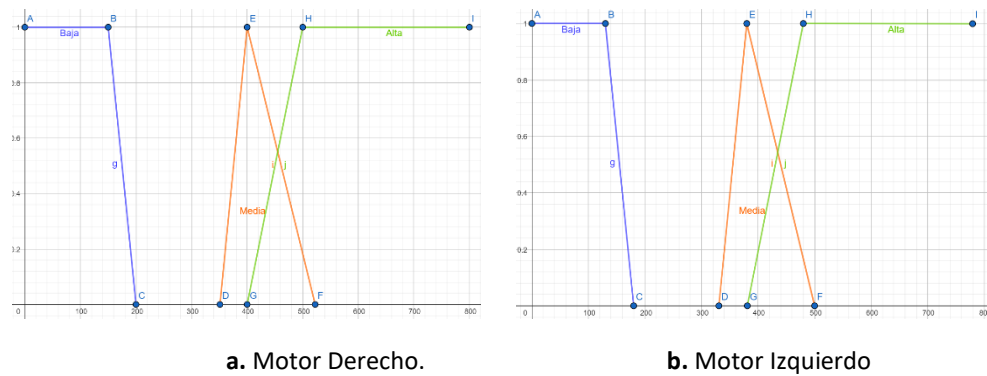
- Sensor Izquierda (Dentro), Sensor Centro (Fuera) y Sensor Derecho (Fuera) = Motor Izquierdo (Baja) y Motor Derecho (Alta)
- Sensor Izquierda (Fuera), Sensor Centro (Dentro) y Sensor Derecho (Fuera) = Motor Izquierdo (Media) y Motor Derecho (Media)
- Sensor Izquierda (Fuera), Sensor Centro (Fuera) y Sensor Derecho (Dentro) = Motor Izquierdo (Alta) y Motor Derecho (Baja)
- Sensor Izquierda (Fuera), Sensor Centro (Fuera) y Sensor Derecho (Fuera) = Velocidad de motores anterior

Las combinaciones no mostradas no son posibles en condiciones normales, sin embargo, en caso de presentarse, los motores se mantendrían con la velocidad anterior.

### 2.3.1 Defuzzificación

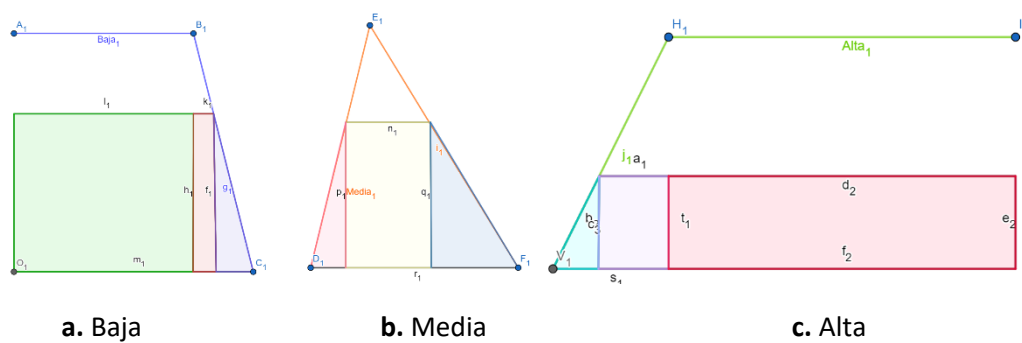
Tomando en cuenta que el valor máximo posible en el PWM es de 800 y que el valor mínimo experimental del PWM para mover el carrito es de 300, se formaron las funciones

de pertenencia mostradas en la Fig. 8. Es importante notar que el Motor Derecho por la distribución de pesos tiene 20 unidades de PWM menos para tener la misma velocidad que el Motor Izquierdo.



**Fig. 8.** Funciones de Pertenencia Motores

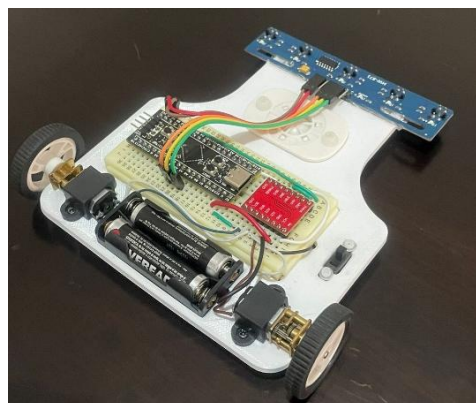
Para la etapa de defuzzificación se calculó el valor del PWM mediante el cálculo del centroide de las figuras formadas en las funciones de pertenencia. El mayor número de figuras posibles y se muestran en la Fig. 9.



**Fig. 9.** Figuras para el Cálculo de Centroides

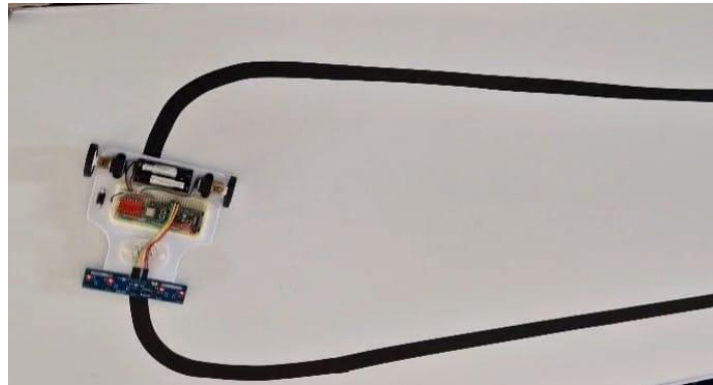
### 3 Resultados

En la Fig. 10 se muestra el montaje completo del carrito seguidor de línea.



**Fig. 10.** Carrito Seguidor de Línea.

Al analizar el comportamiento del carrito se notó como tenía un buen giro en las curvas cerradas gracias a los valores de velocidad escogidos al crear las funciones de pertenencia (Fig. 11). Un detalle inusual que se observó en el carrito es que en ciertas pruebas al ir en línea recta su velocidad aumentaba de manera significativa, mientras que en otras se quedaba en un valor relativamente bajo de velocidad en las mismas condiciones, sin embargo, no es un aspecto que afecte al carrito para el seguimiento de la línea.



**Fig. 11.** Carrito Seguidor de Línea en Funcionamiento.

## 5 Conclusiones

La implementación de lógica difusa para el carrito seguidor de línea ha resultado ser una solución efectiva para el control de un sistema no lineal. La lógica difusa permite que el carrito seguidor tome decisiones adaptativas conforme el carrito avanzaba, modificando la velocidad en función de la situación en la que se encontraba el carrito. Un aspecto para mejorar en el carrito sería integrar los dos sensores de los extremos laterales en el módulo, si bien en un inicio no se integraron por el temor a la complejidad aumentara, ya analizadas las funciones de pertenencia se llegó a la conclusión de que podrían ser utilizados como una extensión de los sensores laterales ya configurados, permitiendo que en caso de haber una curva muy cerrada el carrito tenga más tiempo de reacción. La experiencia obtenida con este proyecto abre la puerta a futuras aplicaciones de la lógica difusa en otros sistemas de control, como robots móviles, drones, entre otros.

## 6 Bibliografía y Referencias

- [1] E. Bello, «Lógica Difusa o Fuzzy Logic: Qué es y cómo funciona + Ejemplos,» iebschool, 15 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.iebschool.com/blog/fuzzy-logic-que-es-big-data/>. [Último acceso: 18 06 2024].
- [2] G. Hamburg, «Automatización Control Difuso,» [En línea]. Available: [https://www.gunt.de/images/download/Conocimientos-bsicos-control-difuso\\_spanish.pdf](https://www.gunt.de/images/download/Conocimientos-bsicos-control-difuso_spanish.pdf). [Último acceso: 19 06 2024].