

# Robótica móvil

## Proyecto 2: Robot móvil terrestre

Óscar Eduardo López Manchola 20151005735  
Juan David Gómez Buitrago 20151005039

**Abstract**—In this paper, it's explained the design required to implement a land mobile robot. To implement it, all the needed components with its reference value are shown. PCB design includes 3D models of every component. On the other hand, some MATLAB simulations aimed to: avoid obstacles, avoid obstacles and go to goal, and follow a wall are presented.

### I. INTRODUCCIÓN

Los robots móviles tienen la capacidad de moverse en su entorno y no se fijan a una ubicación específica. Su aplicabilidad se presenta tanto en la industria como en servicios en general, teniendo por ejemplo robots domésticos para entretenimiento o para los quehaceres del hogar. La robótica móvil reúne ciencias del ámbito de la ingeniería y la programación, a la vez que ciencias cognitivas, inteligencia artificial entre otras. Solo mediante la cooperación entre todos estos ámbitos especializados es posible abarcar la complejidad de los robots móviles.

En este documento se muestra el proceso de análisis requerido para realizar la implementación del vehículo terrestre, donde cada uno de sus elementos son componentes comerciales. Su integración se logra diseñando el PCB del circuito anexándole los modelos 3D de cada una de sus partes para estimar como se vería el vehículo en realidad. En la segunda parte se muestra la simulación de algoritmos que, en base a información obtenida por medio de sensores de distancia, permiten al robot tener diferentes comportamientos, enfocados a evitar obstáculos, llegar a un punto deseado y a realizar el seguimiento de pared.

### II. IMPLEMENTACIÓN VEHÍCULO TERRESTRE

El diseño inicia eligiendo el motor. En particular, se buscan alguno que incluya encoder. Como criterio inicial se desea que sea de corriente continua y que trabaje a 12V. El modelo elegido [1], el cual presenta, en resumen, las siguientes características:

- Tensión de alimentación del motor: 5V - 12V DC.
- Tensión de alimentación del encoder: 3.3V - 5V DC.
- Encoder: Hall de dos fases.
- Resolución del encoder: 341.2 PPR.
- Peso: 95 g.
- Corriente máxima (con carga): 450 mA.

La imagen del motor se muestra en la Fig. 1:

El diseño de la baqueta se realiza en Altium Designer (licenciado para la Universidad Distrital). Para cada motor se utiliza una regleta de 6 pines, cuyo esquemático se muestra en la Fig. 2



Fig. 1. Motor con caja reductora y encoder [1].

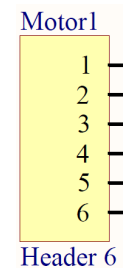


Fig. 2. Esquemático regleta de 6 pines.

Donde:

- Terminal 1 del motor.
- GND.
- Señal A encoder.
- Señal B encoder.
- Vcc (5V) alimentación del encoder.
- Terminal 2 del motor.

Altium permite crear modelos 3D, incluyendo la baqueta con las pistas, la máscara de cada uno de los componentes, su ubicación y un posible cuerpo 3D que permite aproximar el esquemático al posible resultado final de su implementación. Para el motor se utiliza un modelo 3D encontrado en grabcad community [2]. El modelo 3D incluye llanta y se muestra en la Fig. 3:

Por conveniencia, el motor se coloca por debajo del chasis y de la baqueta.

El sensado de distancia se realiza utilizando el ultrasonido HC - SR04 [3], el cual presenta las siguientes especificaciones:

- Tensión de alimentación: 5V.
- Consumo de corriente: 15mA.

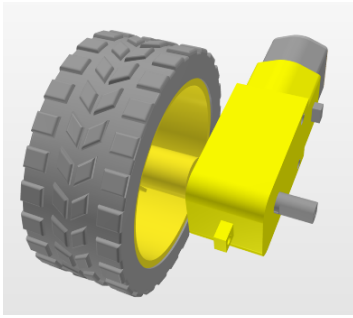


Fig. 3. Modelo 3D motor y llanta.

- Rango máximo de medición: 4m.
- Rango mínimo de medición: 2cm.
- Ángulo de apertura: 15°.

Al igual que para los motores, en la baqueta se ubica una regleta de 5 posiciones, esto con el fin de poder reemplazar algún sensor fácilmente en caso de que deje de funcionar correctamente. En este caso la configuración de pines es la siguiente:

1. Vcc.
2. Trig.
3. Echo.
4. GND.

La imagen del sensor ultrasonido se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4. Sensor ultrasonido HC-SR04 [3].

El funcionamiento del sensor se detalla paso a paso en el diagrama de flujo anexo que representa la forma en que se debe operar. Para este caso se utilizan 5 sensores: uno frontal, dos con orientación de  $\pm 45^\circ$  y dos laterales con orientación de  $\pm 90^\circ$ .

Nuevamente, se tiene un modelo 3D [4] de cada sensor para poder ajustar su posicionamiento de forma tal de que no se generen colisiones entre ellos y con otros componentes y así mismo poder capturar su ubicación y orientación final respecto al marco de referencia del vehículo y el global. El modelo 3D se presenta en la Fig. 5.

La unidad de medida inercial (IMU) elegida es el módulo MPU 9250 [5], el cual presenta, en resumen, las siguientes características:

- Tensión de operación: 3.3V a 5V.
- Rango del acelerómetro:  $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$ .

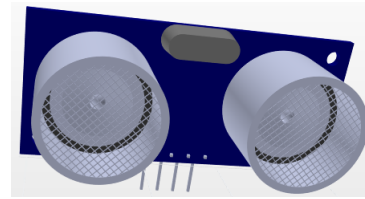


Fig. 5. Modelo 3D sensor ultrasonido HC-SR04 [4].

- Rango giroscopio:  $\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$ .
- Consumo de corriente: 3.7mA máximo.

La imagen del MPU 9250 se muestra en la Fig. 6.

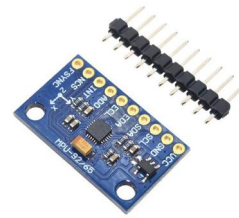


Fig. 6. IMU MPU 9250 [6].

El modelo 3D del IMU [7] se observa en la Fig. 7.

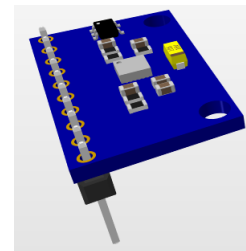


Fig. 7. Modelo 3D IMU MPU 9250 [7].

El módulo bluetooth elegido es el HC-05 [8]. Éste presenta las siguientes especificaciones:

- Tensión de operación: 4V a 6V.
- Consumo de corriente: 30 mA.
- Rango: Máximo de 100 m.
- Se puede comunicar fácilmente con computadores y celulares que tengan bluetooth.

El módulo se muestra en la Fig. 8.

La ubicación del componente se realiza utilizando una regleta de 6 pines con la siguiente distribución:

1. STATE: Está en 1 cuando el módulo está activado.
2. RXD: Pin de ingreso de datos.
3. TXD: Pin de salida de datos.
4. Vcc.
5. GND.
6. Sin uso.

EL modelo 3D del componente [9] se muestra en la Fig. 9. Debido a la gran cantidad de pines que se requieren. La elección del microcontrolador se deja entre los últimos componentes a considerar. Se elige el sistema embebido PSOC



Fig. 8. Módulo bluetooth HC-05 [8].

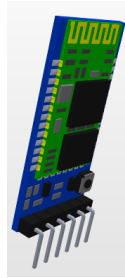


Fig. 9. Modelo 3D módulo bluetooth HC-05 [9].

5LP [10], ya que este cuenta tanto con la cantidad suficiente de pines digitales como con los módulos de transmisión / recepción necesarios. Así mismo es una herramienta ya conocida que se destaca por su fácil configuración y gran versatilidad. Se destacan las siguientes características:

- Tensión de alimentación: 5V.
- Consumo de corriente: 15.4 mA trabajando a 48MHz.

En este caso se utilizan 2 regletas de 30 pines cada una para ubicar el PSoC en la baquela, ya que no se existe la regleta de 26 pines (tamaño real del componente).

La imagen del sistema embebido se muestra en la Fig. 10.



Fig. 10. PSoC 5LP [10].

El driver de potencia elegido para los motores es el conocido puente H, ya que este permite manejar corrientes elevadas que

un microcontrolador no puede entregar y así mismo permite la inversión de giro de una manera muy sencilla.

Se utiliza el integrado L298N, el cual incluye 2 puentes H. El diagrama circuital se muestra en la Fig. 11.

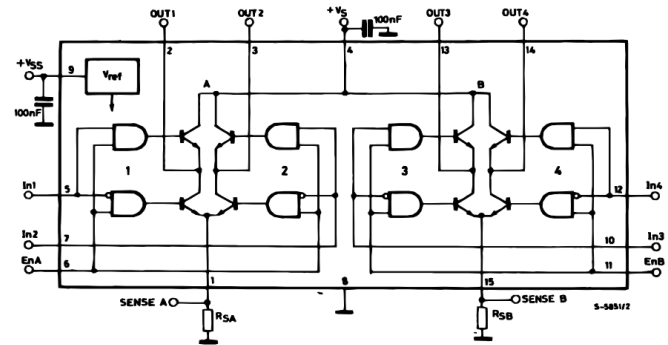


Fig. 11. Circuito puente H doble L298N [11].

La distribución de pines y su función son:

- Sense A y Sense B: Habilita la opción de sensar la corriente de cada motor colocando una resistencia entre este pin y tierra.
- Out 1 y Out 2: Salidas del puente para el primer motor.
- Vs: Tensión de alimentación para la parte de potencia, en este caso 12V.
- Input 1 y 2: Niveles de 5V de control para el primer motor.
- Enable A y Enable B: Señal de habilitación de cada puente H.
- GND.
- Vss: Tensión de alimentación de la etapa de control, 5V en este caso.
- Input 3 y 4: Niveles de 5V de control para el segundo motor.
- Out 3 y Out 4: Salidas del puente para el segundo motor.

El integrado es colocado de forma tal de que se deja el espacio para colocar un disipador de aluminio en caso de ser necesario, para preservar la vida útil del mismo. Se incluye un regulador LM317 [12] para obtener una tensión de 5V a partir de 12V. El voltaje de salida se ajusta por medio de 2 resistencias. El cálculo se realiza en base a la expresión (1):

$$V_{out} = 1,25 * \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (1)$$

Se elige  $R_1 = 10K\Omega$  y  $R_2 = 10K\Omega + 20K\Omega$ . El circuito se muestra en la Fig. 12.

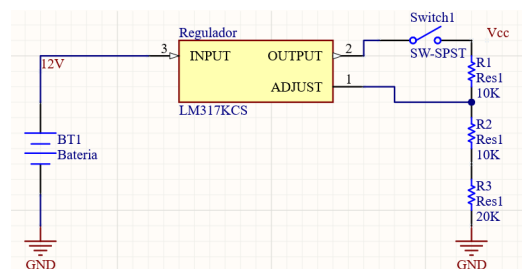


Fig. 12. Regulador a 5V.

El modelo 3D del chasis elegido [13] se muestra en la Fig. 13.

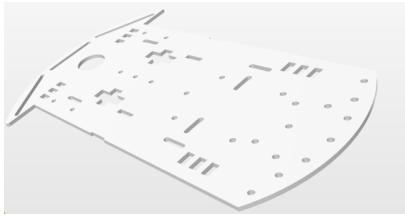


Fig. 13. Modelo 3D del chasis [13].

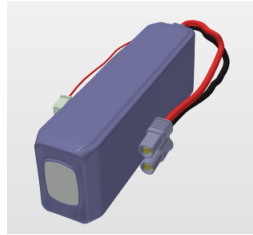


Fig. 14. Modelo 3D de la batería [14].

El tamaño de la baqueta se ajusta acorde a las dimensiones del chasis. La batería a utilizar es de 12V. Para calcular su capacidad, se suman todas las corrientes de los componentes ya presentados. Se tiene:

$$I_{total} = 1061,1mA,$$

El cálculo de la capacidad de hace usando la ecuación (2):

$$\begin{aligned} Cap &= Corriente * tiempo, \\ &= 1061,1mA * 10min, \\ &= 1061,1mA * \frac{1h}{6}, \\ &= 176,85mAh. \end{aligned} \quad (2)$$

La batería elegida [14] es de tipo LiPo de 12 V con capacidad de 2200mAh. El modelo 3D se muestra en la Fig. 14.

La Fig. 15 muestra la integración de los diferentes componentes necesarios para la implementación del vehículo. En la Fig. 16 se muestra el circuito impreso respectivo. Es importante mencionar que las pistas se obtienen haciendo uso de la función de ruteo automático incorporado en Altium, las líneas rojas corresponden a la capa superior y las azules a la capa inferior. Finalmente la integración de cada uno de los modelos 3D permite obtener el vehículo mostrado en la Fig. 17.

### III. DIAGRAMAS

Los algoritmos de control y funcionamiento del robot se encuentran anexos al final del documento. Puesto que hay una gran cantidad de variables en el diagrama, en la tabla I está la descripción de las variables empleadas en los algoritmos de control, lectura de sensores y transmisión de datos.

Para entender mejor los algoritmos se hace una breve explicación de las tareas que se ejecutan para que el robot terrestre siga una trayectoria o evada obstáculos.

TABLA I  
DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.

Variable	Función
Ts	Periodo de muestreo
trigger	Habilitador el tren de impulsos del sensor de ultrasonido
Echo	Detectar la recepción del tren de impulsos transmitido
t	Tiempo de la variable trigger
Cont	Contador con base de tiempo de 1 us
D	Distancia medida por el ultrasonido
R	Matriz de rotación
theta	Ángulo actual del vehículo
x	posición actual del vehículo en el eje x
y	posición actual del vehículo en el eje y
xd	Coordenada en x de la posición deseada
yd	Coordenada en y de la posición deseada
sx	Posición en x del sensor en el marco del robot
sy	Posición en y del sensor en el marco del robot
kt	constante de ponderación
As	Ángulo del sensor en el marco de orientación del vehículo
On	Orientación del obstáculo medida por el sensor n
O	Orientación del obstáculo en marco del carro
U_ao	Vector del obstáculo en el marco global
U_aon	Vector del obstáculo normalizado
U_gtg	Vector de orientación a la meta en el marco global
U_aon	Vector del orientación a la meta normalizado
U_h	Vector del control híbrido
alfa	Constante del control híbrido
e_k	Señal de error del control de ángulo
e_kml	Retardo de la señal de error
wP	Salida del control angular
wP_kml	Retardo de salida del control angular
d_k	Distancia entre punto actual y valor deseado
d_kml	Retardo de d_k
vP	Salida del control de velocidad
vP_kml	Retardo de salida del control de velocidad
p_i	Vector en dirección de la pared izquierda
A_spi	Ángulo de seguimiento de la pared izquierda en MG
p_d	Vector en dirección de la pared derecha
A_spd	Ángulo de seguimiento de la pared derecha en MG
HC_05	Variable bluetooth para transmisión de datos
A_giro	Ángulo de giro en el seguimiento de pared
A	Señal A del encoder
B	Señal B del encoder
TA1,TA2	Auxiliares para el cálculo de velocidad
dta	TA2 - TA1
TB1,TB2	Auxiliares para el cálculo de velocidad
dtb	TB2 - TB1
V_rpm	Velocidad en rpm

#### III-A. Comunicación bluetooth

El módulo HC-05 se usa en configuración maestro, para ello se establece el modo AT2 y la velocidad de 38600 Baudios, el módulo espera a que el microcontrolador termine de calcular los datos para habilitar la transmisión, estos son enviados al transmisor del modulo y este queda a la espera de confirmación de recepción por parte del receptor.

El receptor puede ser un computador portátil. En MATLAB se habilita la comunicación creando un objeto tipo bluetooth con el mismo nombre del módulo. Los datos transmitidos están en binario, por la tanto hay que convertirlos a real, el receptor primero recibe la posición del vehículo y luego la orientación, después envía la confirmación de recepción, gráfica los valores y espera hasta la próxima transmisión. Esta explicación corresponde a los diagramas de los anexos 3,4 y 5.

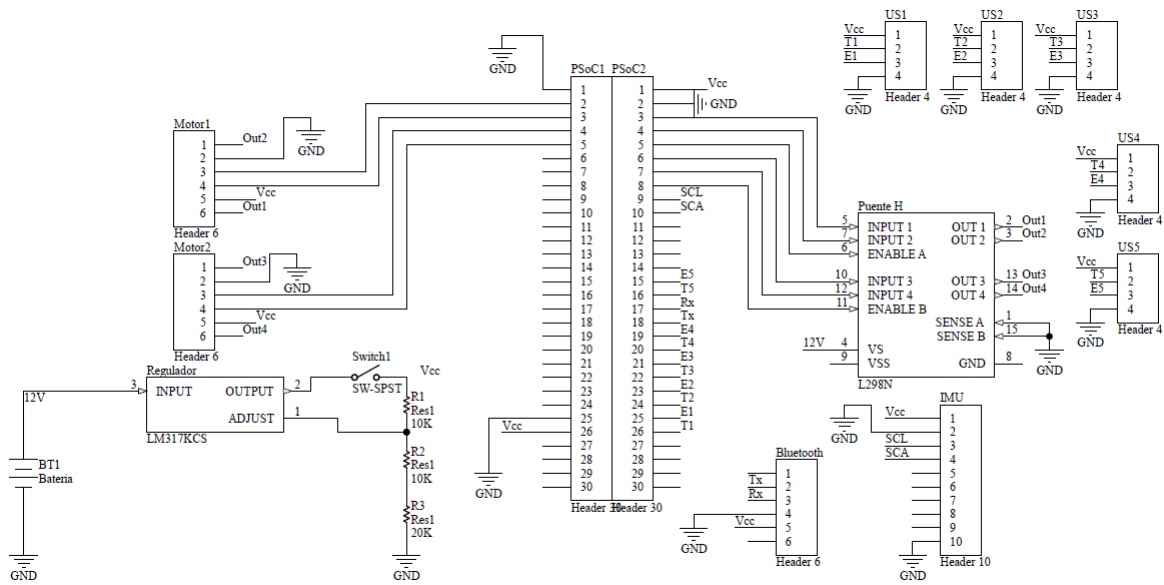


Fig. 15. Esquemático vehículo terrestre.

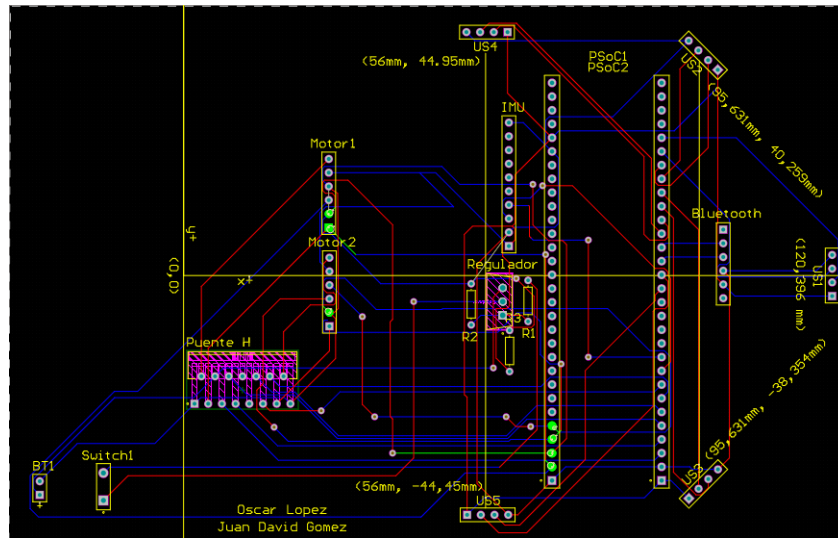


Fig. 16. PCB vehículo terrestre.

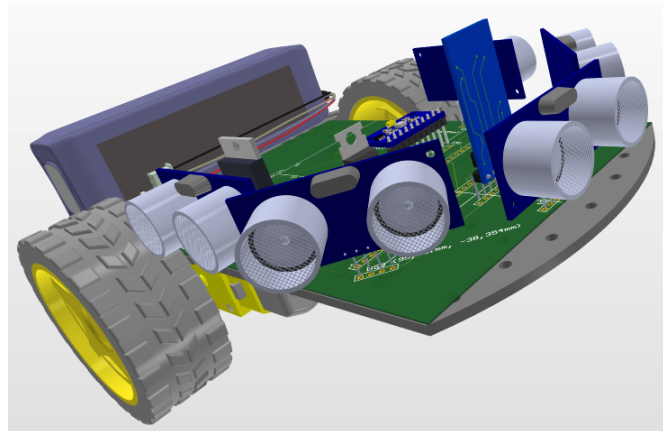


Fig. 17. Vehículo terrestre diseñado.

### III-B. Medición de distancias

Es necesario que el robot detecte los obstáculos a su alrededor, para ello se usan varios sensores de ultrasonido. Para medir una distancia, el sensor envía un tren de 8 pulsos a una frecuencia de 40 KHz. Enviado el último pulso, se activa un contador con una base de tiempo de un 1  $\mu$ s, cuando el receptor recibe el último pulso, finaliza el conteo. El valor del contador se divide por 58 y así se obtiene la distancia en cm. El proceso anterior se repite para los 5 sensores y el vector D que contiene las distancias es utilizado en los algoritmos de control, como variable de decisión para realizar los diferentes cambios de estado presentes en cada algoritmo.

En la simulación cada sensor entrega 15 mediciones de distancia, una cada 2 grados para un ángulo de aperturas de 30°. Para imitar una fuente de ruido se hace el promedio de las 15 mediciones. Los sensores que no detecten un obstáculo se les asigna la distancia de 4 metros. Esta explicación corresponde al diagramas del anexo 4.

### III-C. Medición de velocidad

En el microcontrolador es posible utilizar interrupciones, para la medición de velocidad se usan 2 interrupciones por flanco de subida, gracias a que las señales de los encoders son digitales y ya están acondicionadas para los niveles de tensión del microcontrolador, estas señales no requieren acondicionamiento. Los algoritmos en este caso se ejecutan cada vez que se accede a la interrupción, proceso en el cual se calcula el periodo de la señal cuadrada para estimar la magnitud de la velocidad y se evalúan los niveles de las señales A y B para asignar el signo. Esta explicación corresponde al diagramas del anexo 2.

### III-D. Control PI

Los algoritmos de evasión de obstáculo, ir a la meta y el modo híbrido (combinación de evasión e ir a la meta) dependen de un control PI, que corresponde al controlador angular. Los parámetros del convertidor son  $K_p = 1.5916$ ,  $K_i = 0.5$  y  $T_s = 0.114$ , por medio de las siguientes expresiones se obtienen las constantes del control PI en tiempo discreto

$$wp = b_0 e_k + b_1 e_{km1} + wp_{km1},$$

$$b_0 = K_p + K_i * T_s = 1,5986,$$

$$b_1 = -K_p = -1,5916,$$

$$wp = 1,986 e_k - 1,916 e_{km1} + wp_{km1}.$$

Para el control de velocidad se uso un PI con  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0.5$ , esta explicación corresponde a los diagramas de los anexos 6 al 7.

Sin embargo, hay que tener en cuenta fenómenos adicionales que puedan llevar a que el prototipo no funcione correctamente. Respecto a las pistas, es necesario tener presente las corrientes máximas que pasan por estas, ya que en caso de ser elevadas es necesario ajustar el grosor de las pistas. Por consiguiente, también es recomendable separar las pistas de la etapa de potencia de la etapa de control.

- Otro aspecto a considerar, es el peso de los elementos, ya que esto afecta directamente a la elección de los motores y la batería. El torque de los motores debe ser elegido de forma tal que pueda generar la fuerza suficiente para que el robot pueda desplazarse y por consiguiente la batería debe entregar la carga suficiente para cumplir con las condiciones de autonomía del vehículo solicitadas.
- Es posible obtener un comportamiento de evasión pura del obstáculo o seguimiento de pared con solo ajustar al ponderación de los sensores, siempre cuando los sensores que no detecten obstáculos se les asigne el valor máximo de medición.

### REFERENCIAS

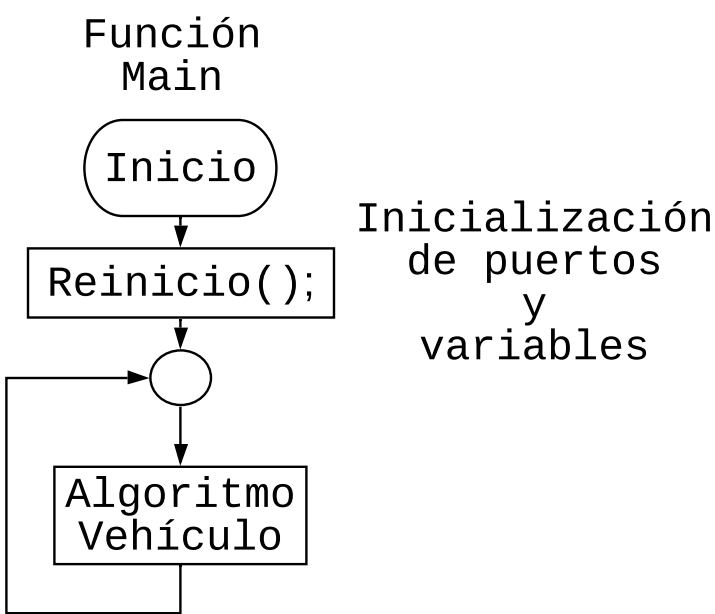
- [1] Motor DC con caja reductora y encoder 25GA - 12V 350RPM.  
Recuperado de: <https://naylorlampmechatronics.com/motores-dc/616-motor-dc-con-caja-reductora-y-encoder-25ga-12v-350rpm.html>
- [2] Motorreductor Con Llanta De Goma Proyectos Arduino.  
Recuperado de <https://grabcad.com/library/motorreductor-con-llanta-de-goma-proyectos-arduino-1>
- [3] Ultrasonic Ranging Module HC - SR04.  
Recuperado de <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- [4] HC-SR04  
Recuperado de <https://www.snapeda.com/parts/HC-SR04/ICS/view-part/>
- [5] MPU-9250 Product Specification Revision 1.1.  
Recuperado de <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [6] Acelerómetro - Giróscopo - Magnetómetro MPU9250 9 Ejes.  
Recuperado de <https://ferretronica.com/products/acelerometro-giroscopo-magnetometro-mpu9250-9-ejes>
- [7] MPU-9250  
Recuperado de <https://grabcad.com/library/mpu-9250-1>
- [8] HC-05 - Bluetooth Module  
Recuperado de <https://components101.com/wireless/hc-05-bluetooth-module>
- [9] HC-05 Bluetooth Module  
Recuperado de <https://grabcad.com/library/hc-05-bluetooth-module-4>
- [10] PSoC 5LP: CY8C58LP Family Datasheet  
Recuperado de <https://www.cypress.com/file/45906/download>
- [11] L298N  
Recuperado de [https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf)
- [12] LM317 3-Terminal Adjustable Regulator.  
Recuperado de <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>
- [13] Chassis of a 2WD autonomous robot  
Recuperado de <https://grabcad.com/library/chassis-of-a-2wd-autonomous-robot-1>
- [14] LiPo Battery.  
Recuperado de <https://grabcad.com/library/lipo-battery>

### IV. CONCLUSIONES

- El uso de un programa especializado en el diseño de circuitos impresos permite obtener un acercamiento bastante bueno de lo que se podría llegar a obtener en la realidad. La inclusión de piezas 3D permite acomodar correctamente cada uno de los componentes evitando colisiones que puedan implicar tener que ajustar el diseño.

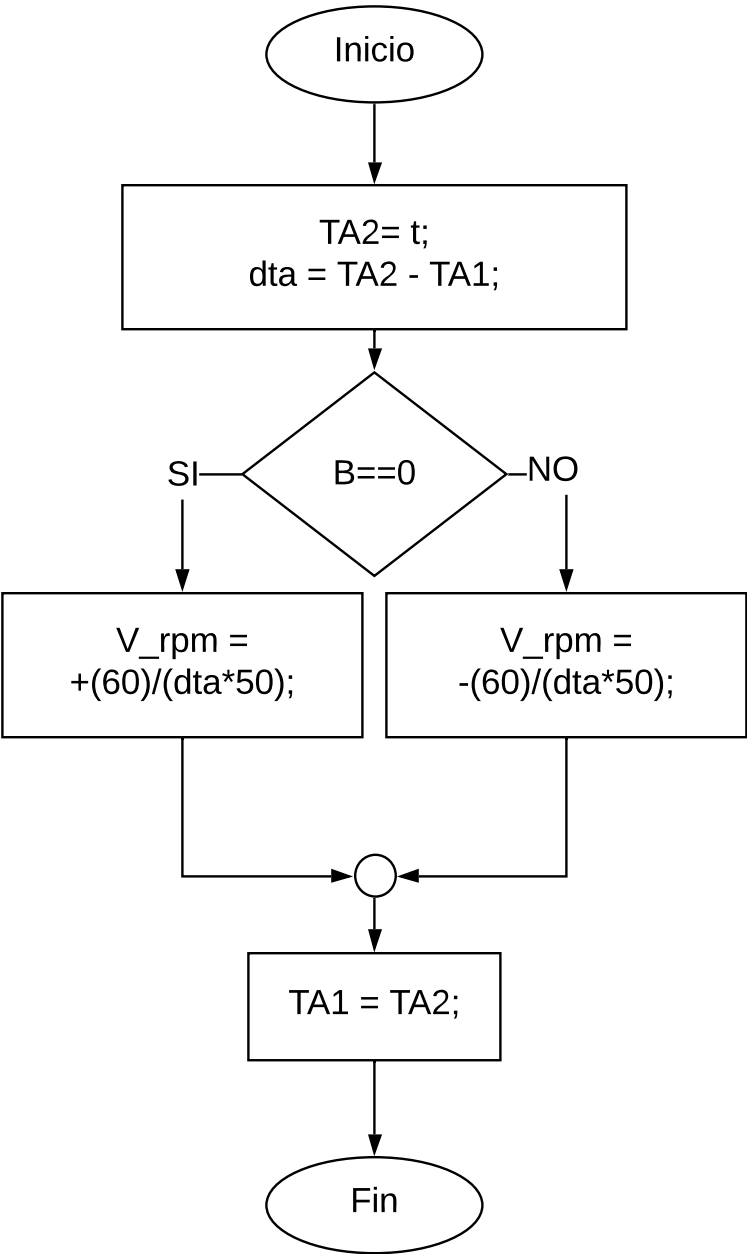


# ANEXO 1

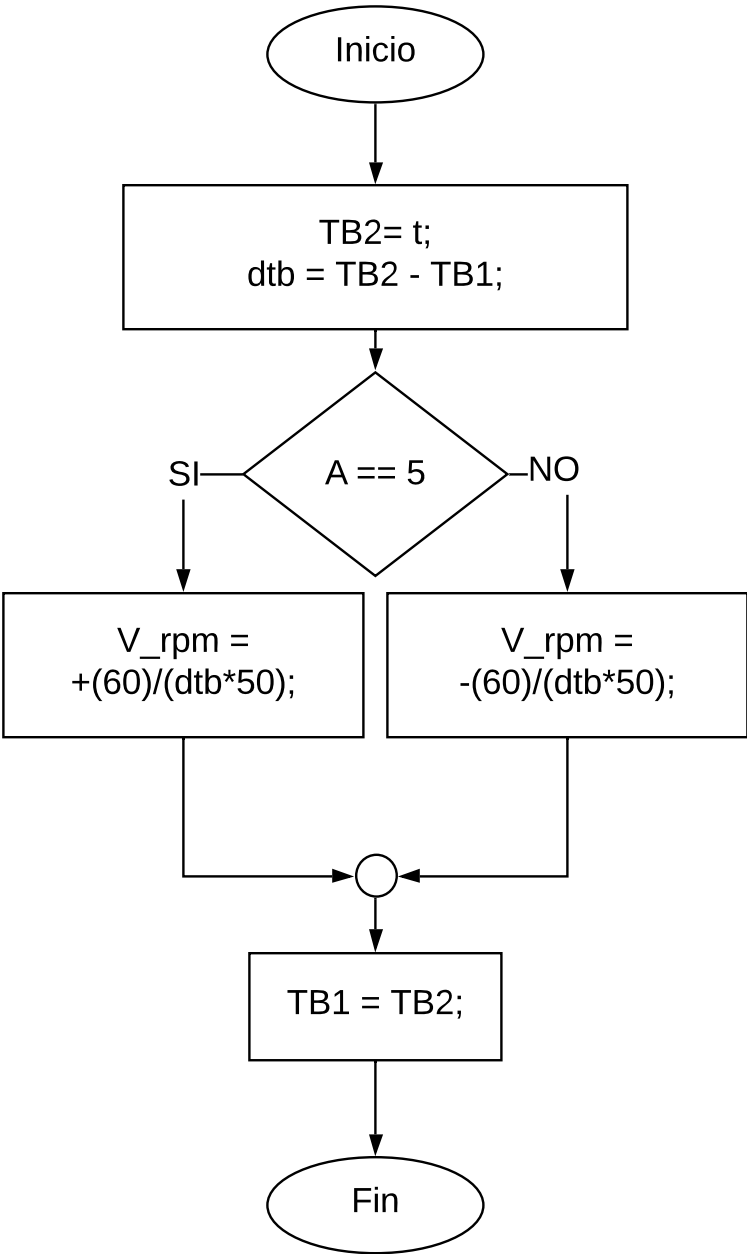


# ANEXO 2

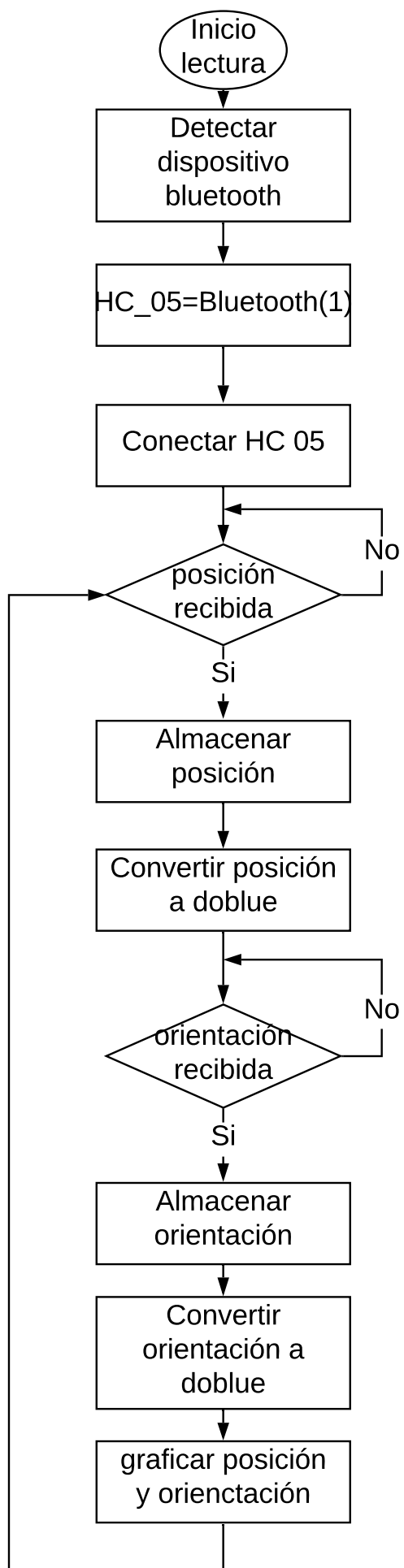
Rutina servicio a la  
interrupción  
Flanco de subida de A



Rutina servicio a la  
interrupción  
Flanco de subida de B



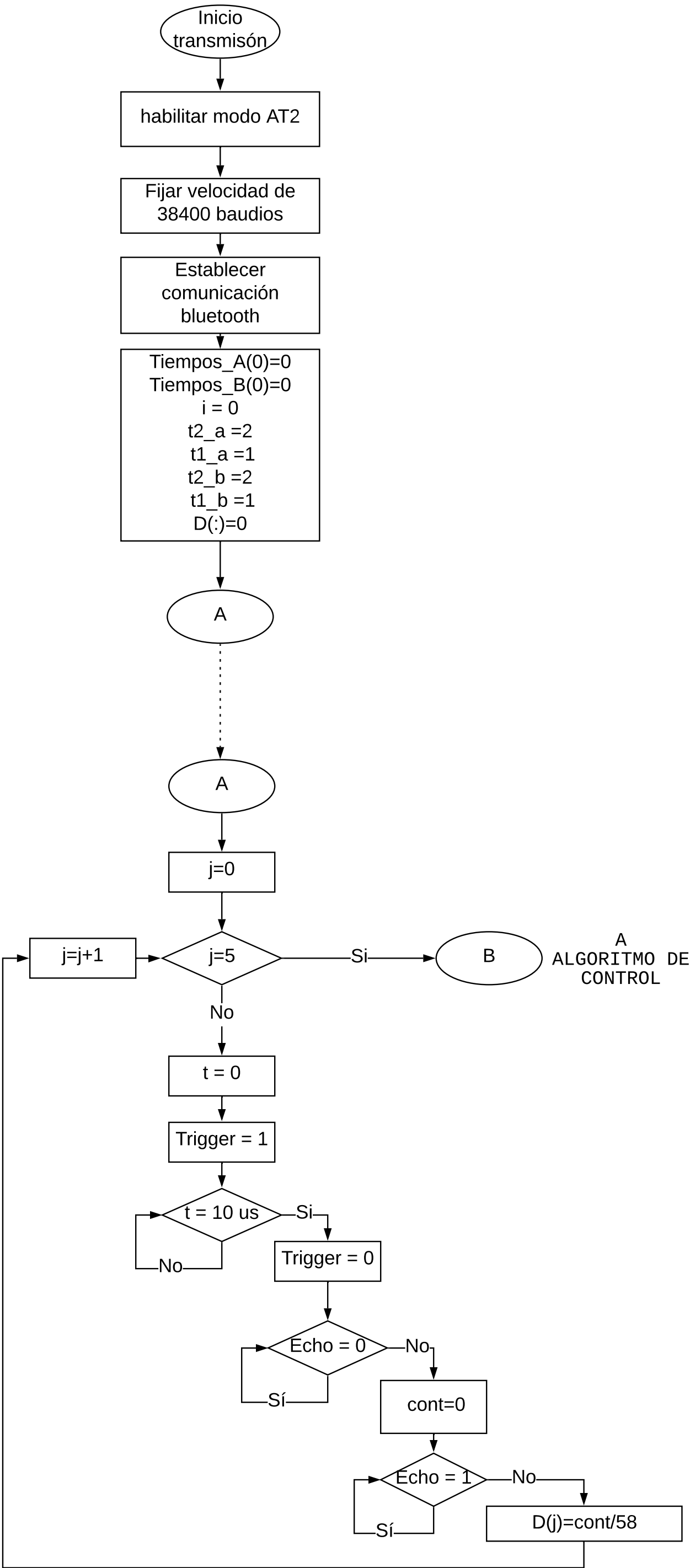
# ANEXO 3



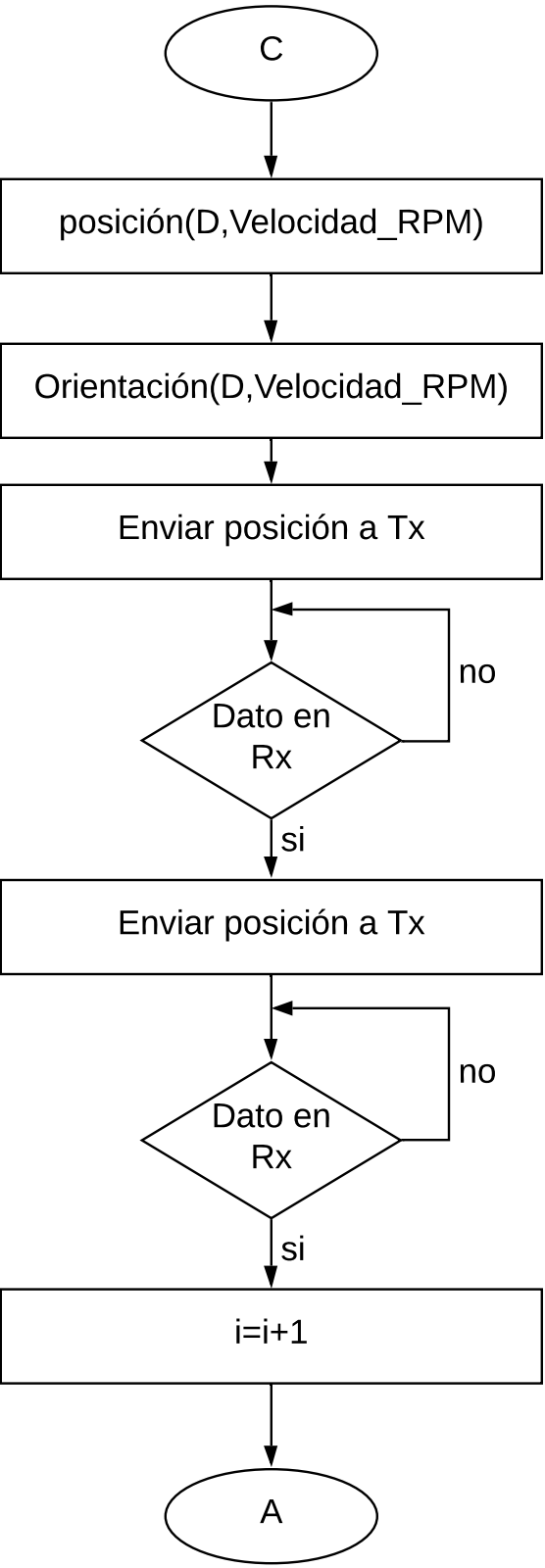


# ANEXO 4

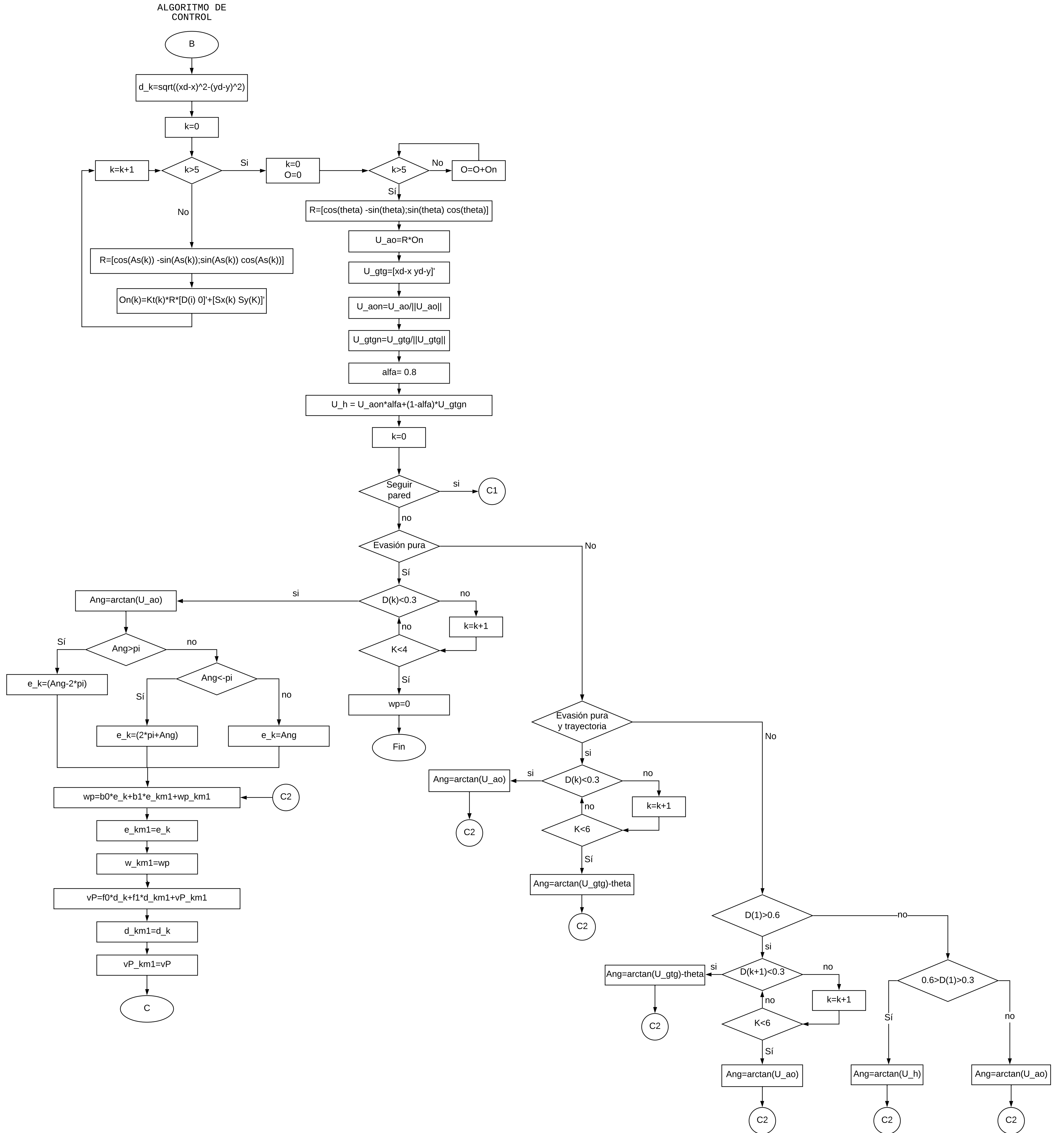
Algoritmo vehículo



# ANEXO 5



# ANEXO 6



ANEXO 7

