

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Prototipo de un Sistema de Tracking y Monitoreo de un Robot  
Transportador**

**Pablo Andrés Chávez García  
David Andrés de la Torre Egas**

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Ingeniería Electrónica

Quito, 04 de Mayo 2012

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Ciencias e Ingeniería Politécnico**

**HOJA DE APROBACION DE TESIS**

**Prototipo de un Sistema de Tracking y Monitoreo de un Robot  
Transportador**

**Pablo Andrés Chávez García  
David Andrés de la Torre Egas**

Carlos Loza, M.Sc. ....  
Director de la Tesis

Omar Aguirre, M.Sc. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Luis Miguel Prócel, M.Sc. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Nelson Herrera, Ingeniero. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Santiago Gangotena, Ph.D. ....  
Decano del Colegio de Ciencias e  
Ingeniería Politécnico

Quito, 04 de Mayo 2012

© Derechos de autor

Pablo Andrés Chávez García  
David Andrés de la Torre Egas  
2012

Agradecemos, en primera instancia, a nuestros padres por el apoyo incondicional que nos han brindado durante todo éste tiempo; en especial en los momentos más difíciles. También agradecemos a Nelson Herrera y Luis Miguel Prócel por la guía y la ayuda brindada durante la realización de las diferentes etapas de éste proyecto.

## **Resumen**

El presente proyecto está conformado por secciones diferentes que apuntan a un mismo objetivo. La primera sección es la parte de localización, la cual está formada por el diseño del transmisor de radiofrecuencia y el transmisor de ultrasonido. La segunda parte inicia con el diseño de los receptores correspondiente a cada tipo de señal; así como la parte de estimación de la posición del robot. La estimación de la posición nace de la técnica de trilateración y es realizada por un microcontrolador que ejecuta operaciones matemáticas en un formato de punto fijo Q8,8. Por otro lado, la etapa que corresponde al robot inicia con el diseño de la estructura mecánica y el diseño del sistema electrónico. Siguiendo con la lógica de programación, el movimiento del robot es diferencial, y posee un control proporcional para su desplazamiento. Finalmente tiene un planeador de trayectorias conjuntamente con un sistema que evade obstáculos que estén dentro de los recorridos del robot.

## **Abstract**

This project is composed of different sections that point into a common goal. The first section refers to the positioning system, which is formed by the design of the RF transmitter and an ultrasound transmitter. The second section begins with the design of the receivers for each type of signal, as well as the estimation of the robot location. The estimation of the position is deduced from the trilateration technique and is performed by a microcontroller, which executes mathematical operations in a fixed-point format Q8,8. Furthermore, the stage that corresponds to the robot starts with the design of the mechanical structure and the design of electronic system. Followed by the programming logic, taking into account the robot has differential motion and uses a proportional control. Finally the system has a trajectory planner and a system that avoids obstacles that are within the robots path.

## **Tabla de Contenido**

<b><u>Introducción</u></b> .....	<b>1</b>
<b>I. Antecedentes</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Definición del proyecto</b> .....	<b>1</b>
<b>III. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
1) Objetivo final.....	2
2) Objetivos específicos.....	2
<b><u>Marco Teórico</u></b> .....	<b>3</b>
<b>I. Ultrasonido</b> .....	<b>3</b>
<b>II. Time of arrival (TOA)</b> .....	<b>6</b>
<b>III. Modulación digital ASK (Amplitude Shift Keying)</b> .....	<b>7</b>
<b>IV. Algoritmos de triangulación</b> .....	<b>9</b>
<b>V. Aritmética de punto fijo</b> .....	<b>12</b>
<b>VI. Morfología del robot</b> .....	<b>14</b>
1) Modelo cinemático.....	14
a. Restricciones cinemáticas.....	14
b. Modelo Jacobiano.....	17
c. Locomoción por guiado diferencial.....	18
2) Sensores.....	19
a. Brújula magnética.....	19
b. Sensor de proximidad.....	20
<b>VII. Navegación</b> .....	<b>21</b>
1) Detección, evitación y planificador de caminos.....	21
2) Planificación de trayectoria.....	24
a. Espacio de configuración (Cspace).....	25
b. Planeadores basados en propagación de onda.....	27
3) Detección de obstáculos.....	29
a. Sistema Fuzzy.....	29
<b><u>Desarrollo</u></b> .....	<b>35</b>
<b>I. Diseño del transmisor del sistema de posicionamiento</b> .....	<b>36</b>
1) Modulo de radiofrecuencia.....	37
a. Protocolo de comunicación.....	38
b. Escritura de datos.....	38
c. Interfaz de radiofrecuencia y ultrasonido.....	39
d. Identificación de satélites.....	40
e. Activación de satélites.....	40
f. Tiempo de espera y sincronización.....	41
2) Modulo de ultrasonido.....	42
a. Oscilador.....	42
b. Amplificador de potencia.....	43
c. Radiación de ultrasonido.....	44
d. Distribución de satélites.....	45

<b>II. Diseño del receptor del sistema de posicionamiento.....</b>	<b>46</b>
1) Modulo de radiofrecuencia.....	46
a. Validación.....	47
b. Vector de satélites.....	47
c. Interrupciones.....	48
d. Temporizador de 16 bits.....	48
2) Modulo de ultrasonido.....	49
a. Amplificación.....	50
b. Rectificación.....	50
c. Comparación.....	51
d. Algoritmo de trilateración.....	52
<b>III. Diseño mecánico y electrónico del robot móvil.....</b>	<b>54</b>
1) Diseño mecánico.....	54
a. Planos del robot móvil.....	54
b. Consideraciones adicionales.....	57
2) Diseño electrónico.....	58
a. Driver de motores.....	59
b. Placa de entradas y salidas.....	61
<b>IV. Diseño del sistema de navegación.....</b>	<b>62</b>
1) Diseño del sistema de planificación de trayectoria.....	63
a. Planeador utilizando Wavefront Propagation.....	63
2) Diseño del sistema de evitación de obstáculos.....	64
a. Sistema Fuzzy.....	64
<b><u>Resultados.....</u></b>	<b>66</b>
<b>I. Adquisición de puntos referenciales.....</b>	<b>66</b>
<b>II. Distancias medidas.....</b>	<b>67</b>
<b>III. Estimación de la posición.....</b>	<b>68</b>
<b>IV. Sistema de navegación.....</b>	<b>71</b>
1) Planificador de trayectorias.....	71
2) Evitación de obstáculos.....	74
3) Control automático.....	76
<b><u>Conclusiones y Recomendaciones.....</u></b>	<b>78</b>
<b>I. Conclusiones.....</b>	<b>78</b>
<b>II. Recomendaciones.....</b>	<b>79</b>
<b><u>Referencias.....</u></b>	<b>81</b>

## **Introducción**

### **I. Antecedentes**

Encontrar la posición de una persona u objeto siempre ha tenido vital importancia tanto en las industrias como en las aplicaciones de la vida cotidiana. Se han buscado soluciones utilizando métodos como triangulación o el uso del giroscopio. Otro sistema que se utiliza actualmente es GPS, con navegación asistida, cuyo objetivo es la localización y posicionamiento de objetos o personas mediante la red celular. La deficiencia de este sistema (GPS) yace en la inhabilidad de funcionar dentro de espacios cerrados que no tienen línea de vista directa entre los satélites y los usuarios. Sin embargo, el presente proyecto presenta una solución para ambientes cerrados con línea de vista, diseñado para el monitoreo y automatización con equipos de tareas específicas. La línea de vista ocurre cuando existe por lo menos un rayo directo entre el transmisor y el receptor de una señal sincronizada de ultrasonido.

### **II. Definición del Proyecto**

El proyecto nace de la necesidad de un sistema de rastreo y transportación de ciertos equipos del laboratorio que se encuentran estáticos; aunque puede ser ampliado para otros escenarios. La automatización y el control en la transportación, conjuntamente con el rastreo, mejoran el rendimiento y eficiencia en ciertas tareas de desplazamiento. Adicionalmente, el módulo de posicionamiento puede ser utilizado como medio de rastreo para empleados que se encuentran en plazas de trabajos extensas. Por ejemplo, la localización de un doctor dentro de un hospital que consta de varias áreas ayudara al control y la rápida intervención de los médicos en situaciones de emergencia.

Existen varias partes del proyecto, la primera es la localización, la cual está compuesta por el diseño de los transmisores de radiofrecuencia y ultrasonido. La siguiente parte es el diseño de los receptores de cada tipo de señales antes mencionadas; así como la parte de estimación de la posición del robot. La estimación de la posición nace de la técnica de trilateración y es realizada por un microcontrolador que ejecuta operaciones matemáticas en un formato de punto fijo Q8,8. La siguiente parte es el diseño mecánico y electrónico del robot móvil que utilizará desplazamiento diferencial. Conjuntamente con la lógica de programación y el control de movimiento en este caso proporcional. Incluyendo un planeador de trayectorias conjuntamente con un sistema de evitación de obstáculos que estén dentro del recorrido del robot.

### **III. Objetivos**

#### **1) Objetivo Final**

- Monitorear y referenciar trayectorias para el robot transportador.

#### **2) Objetivos Específicos**

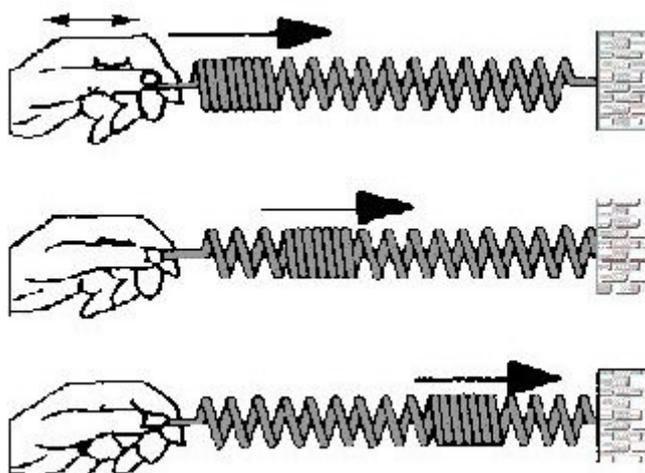
- Diseño del robot móvil.
- Implementación y calibración de sensores.
- Creación de un sistema de actuadores para el movimiento del robot (servos y motores)
- Diseño y creación de tarjetas PCB.
- Programación de microcontrolador. (Protocolo de Comunicación)
- Programación de Arduino. (Algoritmo de navegación)
- Simulación de tarjeta de transmisión y recepción, tarjeta de control. (Proteus, Matlab)

## Marco Teórico

### I. Ultrasonido

El ultrasonido es una onda mecánica (acústica o sonora) producida por la compresión de aire y cuya frecuencia se encuentra por encima del espectro audible del ser humano. Los seres humanos son capaces de distinguir una gama extensa de sonidos siempre y cuando dichas se encuentren dentro del rango de (0 - 20 KHz). Por otro lado, los sonidos superiores a estas frecuencias; como por ejemplo: el ultrasonido, son imperceptibles para el oído.

Dado que las ondas de ultrasonido son mecánicas, estas sufren varios fenómenos físicos en relación a su propagación. En primera instancia, las ondas sonoras son longitudinales, es decir, su frente de onda se mueve en la misma dirección de propagación tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1: Visualización del comportamiento de una onda longitudinal. Fuente:**

Así mismo, la propagación es producido por el desplazamiento de las partículas del medio en el cual viaja la onda [4]. Por ejemplo, las ondas sonoras son producidas por el movimiento de las partículas del aire para poder propagarse (compresión) y la

velocidad con la cual la onda viaja se conoce como la velocidad del sonido. El valor de la velocidad de propagación es estrictamente dependiente del medio en el cual viaja el sonido. El Cuadro 1 muestra algunos valores de la velocidad del sonido a diferentes medios.

**Cuadro 1 : Valores de la velocidad de propagación del sonido con respecto a diferentes medios. Fuente: Manual de Física. Koshkin N. I. y Shirkévich M. G. Editorial Mir, pág 107**

Medio Gaseoso	Velocidad del sonido ( $m/s$ ) a 1 atm
Aire (0°C)	331
Alcohol etílico (97°C)	269
Amoniaco (0°C)	415
Gas carbónico (0°C)	259
Helio (0°C)	965
Hidrógeno (0°C)	1284
Neón (0°C)	435
Nitrógeno (0°C)	334
Oxígeno (0°C)	316
Vapor de agua (134°C)	494

Aunque la velocidad de propagación de una onda sonora depende del medio por el cual viaja; existen otros factores físicos que alteran este valor. Estos factores son: presión, humedad y temperatura. Por ejemplo, si el valor de la temperatura aumenta, la velocidad aumenta de igual manera en forma lineal. Esta premisa es sustentada por la ecuación empírica Ec.1. Por otro lado, la expresión más acertada para el cálculo de la velocidad de propagación sonora nace de la teoría de los “Gases Ideales”, la cual toma la ecuación Ec.2 para dar forma a la expresión general de la velocidad del sonido según Ec.3.

$$v = 331.5 + 0.6(T + 273.15) [m/s] \quad (\text{Ec.1})$$

$$PV = nRT \quad (\text{Ec.2})$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P_o}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde  $T [0^\circ K]$ ,  $R=8.314 [J/(k.mol)]$ ,  $M = 25.95 \times 10^{-3} [kg/mol]$  .

Fuera de la variación de la velocidad de propagación en las ondas sonoras; existe otro fenómeno de gran importancia considerado para todos los equipos tecnológicos que utilizan ultrasonido, el cual es la atenuación. La atenuación es la degradación de la amplitud de una señal con respecto a la distancia. Este descenso de energía tiene un comportamiento exponencial que depende del coeficiente de atenuación del medio en el que viaja la onda sonora. Según Moreno, “el coeficiente  $\alpha$  dependerá de los mecanismos de pérdida acústica que pueden existir en el medio y que pueden tener un gran número de orígenes.”[5]. La ecuación de la atenuación se muestra a continuación:

$$A = A_0 e^{(-\alpha l)} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde  $\alpha [dB \text{ o Nepper } / m]$  y  $l [m]$ .

En las aplicaciones tecnológicas, los sistemas de ultrasonido se pueden clasificar en tres diferentes categorías:

1. **Potencia:** son equipos que generan alta potencia o baja. Las unidades abarcan desde los kilovatios hasta los milivatios.
2. **Frecuencia:** equipos que generan señales sonoras por encima del rango audible que abarca desde los 25KHz hasta 1 MHz
3. **Continuo o pulsado:** equipos que emiten una sola frecuencia a una potencia constante. Usualmente la transmisión se da en pulsos de cierto tiempo y un tiempo de inactividad para esperar el retorno o eco de la señal.  
Por ejemplo: Ecos Doppler.

Los sistemas pulsados o continuos necesitan transductores piezoeléctricos para

poder operar. Estos traductores son capaces de generar ondas mecánicas al recibir una señal eléctrica. Esta habilidad es herencia de las placas de cerámicas piezoeléctricas, usualmente de circonita de plomo [6]. Existen varios tipos de transductores como por ejemplo: los sectoriales (comunes en el mercado, Figura 2), arreglo radial y lineales. Los transductores lineales generalmente se usan con fines médicos.



**Figura 2: Transductores de ultrasonido del tipo sectorial. Fuente: Datasheet 3004 Transducer.**

## **II. Time of Arrival (TOA)**

El tiempo de llegada (Time of Arrival, en Inglés) es una técnica ampliamente usada en equipos de localización. Por ejemplo, los equipos GPS se utilizan el tiempo de llegada del código para así; poder determinar la distancia entre objeto y satélites[1]. La justificación de esta técnica se basa en la correlación cruzada de la señal enviada y la recibida. El pico máximo de la función de correlación cruzada determinará el tiempo en cual la señal llegó al receptor. Como resultado, se pueden estimar distancias, o de cualquier otra variable que dependa directamente del tiempo de propagación de la señal. Existen algunas consideraciones en Time of Arrival, que son necesarias cumplir para su buen desempeño. La mas importante de todas es la sincronización. La toma de datos en TOA va realizarse siempre y cuando transmisor y receptor se encuentren en sincronía perfecta. Sin embargo, este escenario no se presenta en la practica. Para poder

solucionar este problema fundamental en TOA; los transmisores y receptores utilizan dos tipos de señales de naturaleza distinta. Las ondas electromagnéticas (RF) y las ondas de ultrasonido (US) por lo general, son las señales que se usan con frecuencia en TOA. Las ondas electromagnéticas, a diferencia de las ondas de ultrasonido, se propagan a la velocidad de la luz. Como resultado, se envía información de sincronización mediante una señal radiofrecuencia al receptor para así; esperar el tiempo de llegada de la señal de ultrasonido.

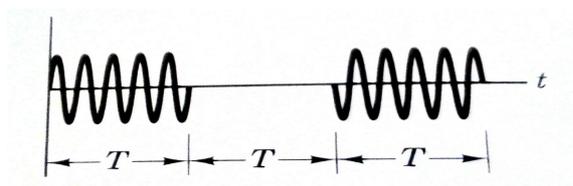
### III. Modulación digital ASK (Amplitude Shift Keying)

La modulación ASK (*Amplitude Shift Keying*) consiste en codificar una señal binaria en amplitudes diferentes teniendo una portadora común. La expresión analítica para esta modulación esta en la siguiente ecuación (Ec.5).

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix} \quad (\text{Ec.5})$$

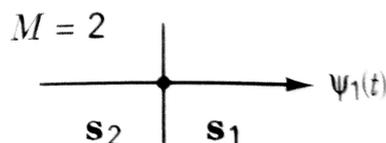
Donde  $E_i$  es la energía del  $i$ -ésimo bit,  $T$  es el tiempo de bit y  $M$  el número de símbolos.

La amplitud de la señal va a depender directamente del símbolo utilizado. Por ejemplo, la configuración usual en ASK es la binaria, o  $M=2$  símbolos, también conocida como On-Off Keying [7]. En esta configuración, el bit 1 es asignado a una amplitud mientras que, el bit cero tiene una amplitud nula como muestra la Figura 3.



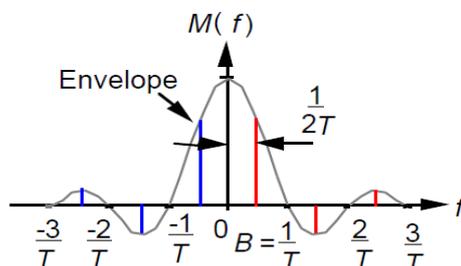
**Figura 3: Señal ASK Binaria en el dominio del tiempo. Fuente: Sklar, Bernard. “Digital Communications: Fundamentals and Applications”. 2da Edición. Estados Unidos: Prentice Hall. Pp. 175-176 (2003). Impreso.**

Debido a que la modulación binaria ASK solo tiene dos símbolos; la constelación correspondiente a este escenario solo tiene una componente en fase. Ver Figura 4.



**Figura 4: Constelación BASK, esta no tiene componente en cuadratura. Fuente: Sklar, Bernard. “Digital Communications: Fundamentals and Applications”. 2da Edición. Estados Unidos: Prentice Hall. Pp. 175-176 (2003). Impreso.**

En el dominio de la frecuencia, la modulación ASK binaria solo tiene una componente espectral centrada en la portadora dado que solo existe una frecuencia única. El ancho de banda relacionado a la señal ASK va a depender directamente de la tasa de bits de información, tal como muestra el espectro de la Figura 5.



**Figura 5: Espectro de frecuencia de BASK. Fuente: Sklar, Bernard. “Digital Communications: Fundamentals and Applications”. 2da Edición. Estados Unidos: Prentice Hall. Pp. 175 (2003). Impreso.**

En la detección de bits, la modulación ASK binaria solo tiene dos alternativas para discriminarlos los símbolos. Cada uno de los símbolos se encuentra en una zona distinta dentro la constelación ASK. La región que discrimina el bit cero y el uno se la conoce como Treshold(  $\gamma_0$  ). Su valor óptimo viene dado por la Ecuación 6.

$$\gamma_0 = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad \begin{matrix} a_1 = 1 \\ a_2 = 0 \end{matrix} \quad (\text{Ec.6})$$

Aunque los símbolos de modulación BASK se encuentran en zonas alejadas entre sí; la detección de los mismos puede sufrir errores debido al ruido u otros efectos del canal inalámbrico. Según la Ecuación 7, la probabilidad de error en la detección dependerá directamente de la energía del bit; así como de la potencia del ruido del canal.

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (\text{Ec.7})$$

Donde  $N_0$  es la potencia de ruido en el canal. La función  $Q(x)$  es la “Función de error complementario”, o “Complementary Error Function” y nace de la “Función de error”  $\text{erfc}(x)$  [8].

#### IV. Algoritmos de triangulación

En los dispositivos y sistemas de localización, ya sea satelital como GPS, o de red como la celular; el método o algoritmo usado para estimar la posición dependerá de la naturaleza en la que los datos de adquisición sean obtenidos. Por ejemplo, el sistema GPS utiliza un algoritmo del tipo recursivo para poder estimar la posición utilizando como datos experimentales el desfase entre el código recibido y el local[1]. El dato final obtenido del desfase de código es conocido como pseudorange (Ec.8); y sirve como entrada de la matriz H (Ec.9). La matriz H utiliza las variaciones de los rangos para poder satisfacer el sistema de ecuaciones formada por la posición relativa entre los satélites y el usuarios en Tierra. De manera adicional, este tipo de algoritmo mantiene el “tracking” de la señal entre usuario y satélite, ya que se asume que ambos se encuentran en constante movimiento.

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + b_u \quad (\text{Ec.8})$$

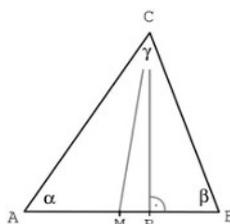
Donde  $i$  representa el número de satélites,  $b_u$  el error de sincronización y el subíndice  $u$  es la posición absoluta del usuario.

Debido a que la Ecuación 8 es del tipo no lineal, la resolución de la misma comprendería el uso de técnicas complejas de cálculo; además de complicar la estructura a nivel de la unidad aritmética del dispositivo GPS. Sin embargo, mediante un proceso de linealización, el conjunto de ecuaciones no lineales de Ec.8 se transforma en la matriz H cuya solución se determina mediante un despeje de matrices.

$$H = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}; \quad (\text{Ec.9})$$

$$\text{Donde } \alpha_{i1} = \frac{x_i - x_u}{\rho_i - b_u}, \alpha_{i2} = \frac{y_i - y_u}{\rho_i - b_u} \text{ y } \alpha_{i3} = \frac{z_i - z_u}{\rho_i - b_u} .$$

Por otro lado, para los sistemas de posicionamiento en interiores, el uso de desfase de código producirá una variación de tiempo imperceptible para el receptor; siendo inapropiado su uso. Sin embargo, la localización en estos ambientes ha sido resuelto utilizando otro tipo de señales, como los pulsos de ultrasonido. En este tipo de escenario, los transmisores se encuentran fijos por lo que, los métodos iterativos no resultarían de uso práctico. El tipo de estrategia que se usa para resolver las ecuaciones de localización es: la geometría euclidiana de ángulos y lados. Por ejemplo, la triangulación, la trilateración y multilateración. La triangulación euclidiana consiste en obtener el valor del ángulo formado por el objeto a localizar y dos puntos fijos ya establecido como base de un triángulo de referencia [2]. La estimación de la posición se calcula mediante la aplicación de la relación geométrica de triángulos rectángulos dadas por la Ecuación 10.



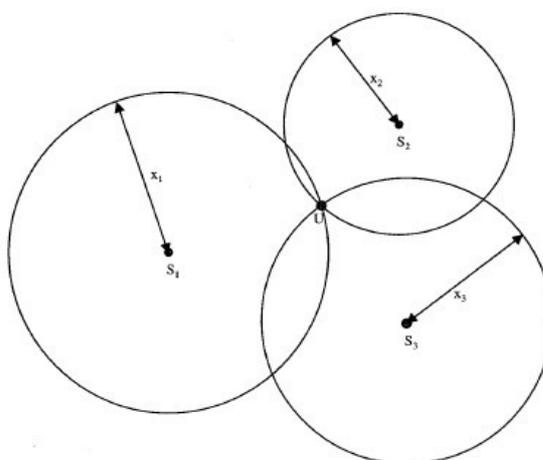
**Figura 6: Esquema de localización por triangulación. Fuente: Técnicas de observación. Extraído de <http://usuarios.multimania.es/aduarte/articulos/tecnicas/>.**

$$d = \frac{l \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde  $l$  es la distancia entre dos puntos fijos de referencia en la base del triángulo y  $\alpha$  y  $\beta$  son los ángulos entre el objeto y los vértices del triángulo.

El método de triangulación solo sirve si se supone que el objeto a localizar se encuentra en un plano bidimensional euclidiano. Sin embargo, esto no es correcto ya que, la tierra no es plana y el modelo no toma en cuenta la curvatura natural de la tierra. Por otro lado, para ambientes interiores cuyas distancias no exceden 1Km de longitud; la triangulación funciona.

Otro algoritmo de localización usado para ambientes de interiores es la trilateración. La trilateración es muy parecida en su naturaleza adquisitiva al método empleado por GPS. En ambos casos, la adquisición de los datos experimentales viene dado por la medición de las distancias entre puntos referenciales. La única diferencia existente entre ambos está en que; para la trilateración los puntos de referencias son fijos, mientras que para GPS estos orbitan alrededor de la Tierra[3]. Ver Figura 7.



**Figura 7: Esquema de localización por Trilateración con tres puntos fijos. Fuente: Fundamentals of Global Positioning System Receivers, cap 2.2, pág 9.**

Por lo tanto, si se considera fijo los puntos de referencia (satélites); el conjunto de ecuaciones formado por las estaciones fijas es de naturaleza invariante con solución única. La Ecuación 11 muestra las soluciones en los ejes  $x,y,z$  para la trilateración suponiendo que cada estación se encuentra a la misma altura pero en diferente localidades. Por ejemplo, la estación 1 se encuentra en  $(0,0,h)$  , la estación 2 en  $(0,d,h)$  ; y la estación 3 se encuentra en  $(i,j,h)$  .

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde  $(r_1, r_2, r_3)$  son los rangos medidos desde el origen de cada estación.

## V. Aritmética de punto fijo

La representación numérica a nivel digital ha sido parte fundamental en el procesamiento de datos, ya sea mediante el uso de computadoras, calculadoras, o los Digital Signal Processing (DSP). Todos estos dispositivos operan mediante una presentación binaria, limitada por cierta cantidad de bits, de la información que se le es ingresada. La cantidad de bits disponibles para la presentación numérica va a ser limitada específicamente a nivel de Hardware ya que la unidad aritmética tiene una longitud determinada de bits.

Para representar un número real, es decir, un número que contenga una parte entera y una fraccionaria; se tiene que tomar en cuenta el rango de representación de los bits. Si se quiere poseer una alta precisión de los datos, el número de bits para la parte menos significativa debe ser alta. Por consiguiente, el espacio entre muestra y muestra; y el rango máximo determina la exactitud de la representación numérica.

El formato de representación fraccionaria se define como  $Q(a,b)$  donde  $a$  es el

número de bits para la parte entera; y b es el número de bits para la parte fraccionaria[9]. Este formato se lo conoce como punto fijo y posee una estructura fija en sus operaciones matemáticas. La suma de números de punto fijo se realizó de la misma manera que para los números reales; la única condición para establecer la suma es que, ambos tengan el mismo formato. Por otro lado, la multiplicación es un poco más difícil en si ya que, al multiplicar dos números de un mismo formato, los bits resultantes de esta operación aumentan. Esto genera un problema ya que, solo se maneja un formato establecido. Para superar este inconveniente, se realiza un truncamiento o eliminación de los bits menos significativos hasta obtener el mismo número de bits que el formato de los operandos [9]. Por ejemplo, si se multiplica dos números de 16 bits cada uno, entonces el resultado tiene un total 32 bits, de los cuales, solo los 16 bits de la mitad son escogidos para mantener el formato. De esta manera, se elimina los bits menos significativos sin eliminar información importante [9]. Ver Figura 8.

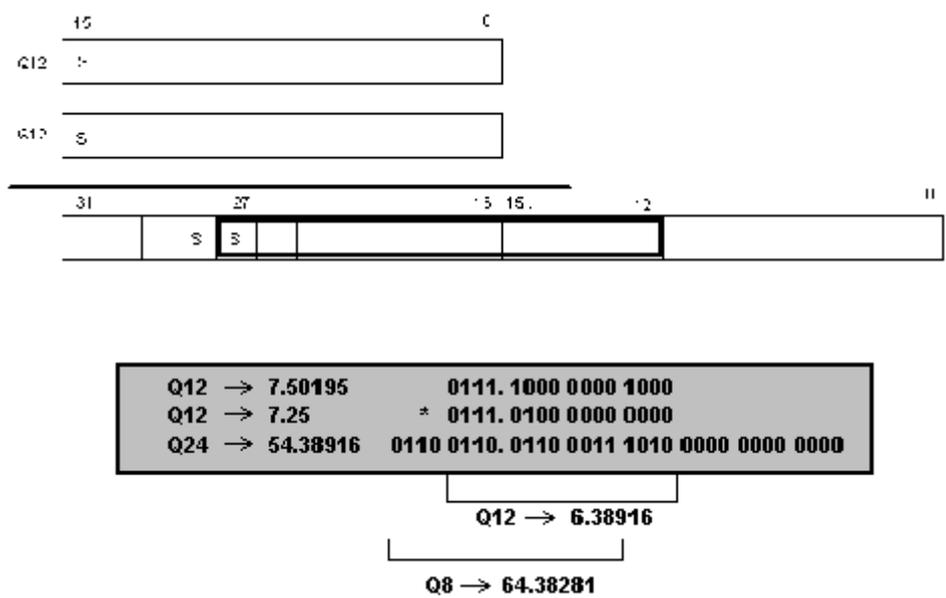


Figura 8: Multiplicación entre dos numero formato Q 8,8. Fuente:

## VI. Morfología de robot:

### 1) Modelo Cinemático:

Se debe considerar un robot móvil con ruedas, por lo que se definen los siguientes puntos el robot se mueve en una superficie plana, los ejes de guiado son perpendiculares al suelo, no existe deslizamiento. Se define que en un tiempo pequeño en el que se mantiene constante una consigna de dirección, el vehículo se moverá de un punto a otro a lo largo de un arco de circunferencia. El robot se comporta como un sólido rígido y no tiene partes flexibles [14].

#### *a. Restricciones Cinemáticas*

Sea  $p = [p_1 \dots p_r]^T$  un vector de las variables necesarias para determinar completamente la posición y orientación de todas las partes de un sistema físico en este caso un robot. Al utilizar estas variables para describir un movimiento se debe tener en cuenta que las variables pueden ser no independientes. Esto causa restricciones cinemáticas las cuales se puede formular del tipo:

$$G_k(p, p', t) = 0; \quad k = 1, \dots, s; \quad (\text{Ec.12})$$

*Donde  $p$  son las variables,  $p'$  sus derivadas,  $t$  tiempo y  $s$  las restricciones.*

Estas restricciones pueden ser holónomas o no holónomas; las holónomas son aquellas en las que no intervienen las velocidades. Las no holónomas dependen de las velocidades y no deben ser integrales lo que significa que no se deduzca por derivación total en respecto al tiempo de la holónoma. Para este caso, los robots móviles tienen relaciones no holónomas entre las coordenadas en el espacio de los actuadores y las coordenadas del espacio cartesiano [14].

Si se considera un sistema de referencia  $\{G\}$  y un sistema  $\{L\}$  con centro en el punto de guiado del vehículo y eje  $\hat{Y}_L$  en la dirección del eje longitudinal del vehículo como muestra en la figura 9.

Si se supone que el vehículo se desplaza en un intervalo de control según un arco de circunferencia como se muestra en la figura 10. La velocidad del vehículo viene dada por:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \omega = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (\text{Ec.13})$$

*Donde la Velocidad lineal ( $v$ ) y velocidad angular ( $\omega$ ) siendo  $\Delta s$  y  $\Delta \Phi$  respectivamente el espacio recorrido por el punto de guiado del vehículo y su cambio de orientación en el intervalo  $\Delta t$ .*

La longitud  $\Delta s$  del ángulo recorrido por el robot viene dada por:

$$\Delta s = R\Delta \phi \quad (\text{Ec.14})$$

*Donde  $R$  el radio de giro o radio de la circunferencia que describe el punto guiado.*

Las ecuaciones de movimiento en el sistema  $\{L\}$  de la figura 10 en la posición inicial son :

$$\Delta x = -(R - R \cos \Delta \Phi)$$

$$\Delta y = R \sin \Delta \Phi \quad (\text{Ec.15})$$

*Donde  $\Delta x$  y  $\Delta y$  es la posición inicial.*

Si la orientación inicial del vehículo respecto al sistema  $\{G\}$  es de  $\Phi$ , el movimiento en el sistema  $\{G\}$  se determina rotando  $\Phi$ .

$$\Delta x = R[\cos(\Delta \Phi) - 1]\cos(\Phi) - R\sin(\Delta \Phi)\sin(\Phi)$$

$$\Delta y = R[\cos(\Delta \Phi) - 1]\sin(\Phi) + R\sin(\Delta \Phi)\cos(\Phi) \quad (\text{Ec.16})$$

*Donde  $\Phi$  es la orientación inicial del sistema.*

Suponiendo que el intervalo de control es suficientemente pequeño, también lo será el cambio de orientación  $\Delta\Phi$  con lo cual se tendrá que  $\cos(\Delta\Phi) \cong 1$  y  $\sin(\Delta\Phi) \cong \Delta\Phi$  por lo que utilizando las ecuaciones anteriores y tomando en cuenta la ecuación 14 se obtiene:

$$\begin{aligned}\Delta x &= -R\Delta\Phi \sin(\Phi) & \Delta x &= -\Delta s \sin(\Phi) \\ \Delta y &= R\Delta\Phi \cos(\Phi) & \Delta y &= \Delta s \cos(\Phi) \quad (\text{Ec.17})\end{aligned}$$

Se sustituye con la ecuación 14.

Ahora se dividen ambas ecuaciones para  $\Delta t$ , tomando en cuenta la ecuación 13 y haciendo tender este a 0 tenemos:

$$\begin{aligned}x' &= -v \sin(\Phi) \\ y' &= v \cos(\Phi) \\ \Phi' &= \omega \quad (\text{Ec.18})\end{aligned}$$

Donde  $x'$  e  $y'$  es la variación de posición y  $\Phi'$  la variación de la orientación.

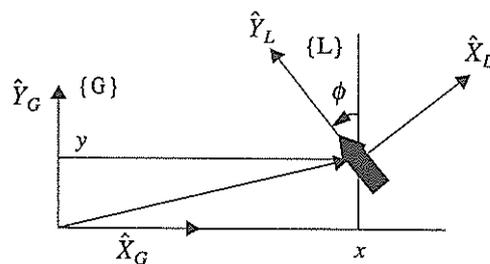


Figura 9. Cambio de referencia en navegación de robots móviles [14].

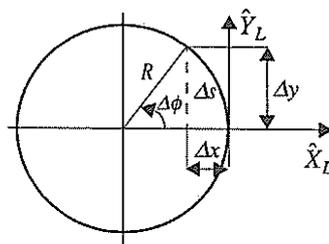


Figura 10. Círculo osculador [14].

### ***b. Modelo jacobiano***

Sea  $p$  el vector que representa un punto en el espacio de  $n$  coordenadas generalizadas y  $q$  el vector de  $m$  variables de actuación, siendo  $n > m$ . Sean  $p'$  y  $q'$  las derivadas temporales correspondientes. Se considera que las variables se expresan en el sistema de referencia global  $\{G\}$  donde  $p' = J(p)q'$  siendo  $J(p)$  el jacobiano, el cual puede escribirse de la siguiente forma:

$$p' = f(p) + \sum_{i=1}^m g_i(p) q'_i \quad (\text{Ec.19})$$

*Donde  $f$  y  $g$  funciones vectoriales analíticas.*

Si se considera que  $p = [x \ y \ \Phi]^T$  es el vector de las coordenadas globales del punto de guía del vehículo y la orientación, por lo que la ecuación 18 puede expresarse en la forma de la ecuación 19 siendo  $f(p) = 0$ ;  $m = 2$  como:

$$p' = \begin{bmatrix} -\sin \Phi \\ \cos \Phi \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (\text{Ec.20})$$

*Donde  $v$  es la velocidad lineal y  $\omega$  es la velocidad angular.*

Así mismo se puede expresar de la forma  $p' = J(p)q'$  siendo  $q' = [v \ \omega]^T$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \Phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi & 0 \\ \cos \Phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.21})$$

*Donde  $v$  es la velocidad lineal y  $\omega$  la velocidad angular.*

Si se utilizan las dos primeras filas de la ecuación 21 se puede encontrar la restricción independiente de  $v$ :

$$x' \cos(\Phi) + y' \sin(\Phi) = 0 \quad (\text{Ec.22})$$

Según esta restricción el vehículo debe moverse en cada instante según la dirección de su eje longitudinal de simetría. Se puede ver que la posición (x,y) y la orientación  $\Phi$  no son independientes [14].

### *c. Locomoción con guiado diferencial*

En este caso como se observa en la figura 11 las variables de control son las velocidades de las ruedas laterales. Sean  $\omega_i$  y  $\omega_d$ , las velocidades de giro de las ruedas izquierda y derecha respectivamente. Si el radio de la rueda es  $c$ , las velocidades lineales correspondientes son  $v_i = \omega_i c$  y  $v_d = \omega_d c$ . Por lo que en este caso la velocidad lineal y angular correspondientes al modelo de la ecuación 19 vienen dadas por:

$$v = \frac{v_d + v_i}{2} = \frac{(\omega_d + \omega_i)c}{2}$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{b} = \frac{(\omega_d - \omega_i)c}{b} \quad (\text{Ec.23})$$

*Donde es  $b$  la distancia entre las dos ruedas centrales.*

Ahora si se especifican la velocidad lineal  $v$  y la angular  $\omega$  del vehículo, los velocidades de giro que hay que aplicar a las ruedas izquierda y derecha son:

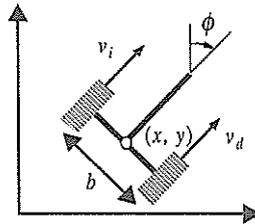
$$\omega_i = \frac{v - \left(\frac{b}{2}\right)\omega}{c}$$

$$\omega_d = \frac{v + \left(\frac{b}{2}\right)\omega}{c} \quad (\text{Ec.24})$$

Para finalizar utilizando la ecuación 23 junto con el modelo de la ecuación 20 se puede expresar en función de estas variables de control como:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \Phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(c \sin(\Phi))}{2} \\ \frac{(c \cos(\Phi))}{2} \\ \frac{-c}{b} \end{bmatrix} \omega_i + \begin{bmatrix} -\frac{(c \sin(\Phi))}{2} \\ \frac{(c \cos(\Phi))}{2} \\ \frac{c}{b} \end{bmatrix} \omega_d = \begin{bmatrix} -\frac{(c \sin(\Phi))}{2} & -\frac{(c \sin(\Phi))}{2} \\ \frac{(c \cos(\Phi))}{2} & \frac{(c \cos(\Phi))}{2} \\ \frac{-c}{b} & \frac{c}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_d \end{bmatrix}$$

(Ec.25)



**Figura 11. Robot móvil, configuración diferencial [14].**

## 2) Sensores:

### a. Brújula Magnética

Se utiliza para medir la orientación del vehículo, las brújulas son magnetómetros, lo que significa que miden el campo magnético, en este caso el campo de la Tierra. Generalmente se utilizan las brújulas basadas en magnetómetros de núcleo saturable. Lo que significa que utilizan la saturación magnética del núcleo de un material altamente permeable empleando para ello una corriente alterna. Cuando un material altamente permeable se introduce en un campo magnético uniforme, las líneas de fuerza se dirigen por el camino de menor resistencia. Sin embargo, si el material está saturado por un efecto magnetizador suplementario, las líneas de flujo de campo externo no se modifican. El magnetómetro hace uso de este efecto de saturación para medir directamente la intensidad del campo magnético de los alrededores [15].

Existen distintos tipos de magnetómetros, dependiendo de la clase de núcleos y de devanados. Los núcleos con geometría de anillo son muy utilizados. Existe un devanado de

excitación, así como devanados de medida enrollados sobre el anillo que se disponen de forma ortogonal. Las tensiones de continua en las salidas  $V_x$  y  $V_y$  de los devanados de medida, varían como funciones del seno y del coseno del ángulo  $\theta$  del sensor con el campo magnético terrestre. El valor instantáneo del ángulo se obtiene digitalizando los valores de las tensiones analizando y realizando la operación del arco tangente:

$$\theta = \arctg \frac{V_x}{V_y} \quad (\text{Ec.26})$$

*Donde  $V_x$  y  $V_y$  son las salidas de tensión continua de los devanados.*

Existen otro tipo de magnetómetros basados en inductancia o efecto hall, de igual manera existen las brújulas magnetorresistivos y magnetoelásticos que están basados en propiedades de los materiales. Como por ejemplo las brújulas magnetorresistivas, mostrado en la figura 12, las cual utiliza la propiedad de ciertos materiales que varían su resistencia eléctrica cuando son sometidas a un campo magnético [15].



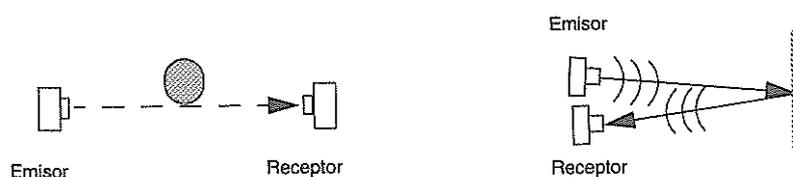
**Figura 12. Sensor magnetorresistivo HMC6352 [20] .**

### ***b. Sensor de Proximidad***

En primer lugar, cabe mencionar que los sensores que detectan la presencia de un objeto, los mas simples son los interruptores mecánicos tales como los habituales finales de carrera. Se emplean también otros sensores que detectan la presencia de objetos sin que exista un contacto mecánico [16].

La presencia de objetos puede detectarse mediante sensores ópticos tipo barrera en los que el objeto intersecta la línea entre el emisor y el receptor tal como esta en al figura 13. Se emplean diodos emisores de luz y fotodetectores tales como fotorresistores, fotodiodos o fototransistores. Los fotorresistores o fotocelulas son resistencias cuyo valor cambia con la intensidad de luz recibida. Los fotodiodos tienen mayor sensibilidad y producen una señal lineal en un rango muy amplio de niveles de intensidad. Sin embargo, su salida necesita ser amplificada [16].

Se emplean también sensores ópticos en los que el emisor y el receptor se montan sobre el robot detectando la presencia del objeto por reflexión de luz en el objeto tal como se muestra en la figura 13. El enfoque se consigue mediante lentes apropiadas. En particular, se utilizan sensores de infrarrojo cercano que son sensibles a longitudes de onda, tales como 880nm, inmediatamente inferiores a lo visible. A estos sensores también se les denomina sensores de proximidad. Estos pueden tener un circuito especial para medir el tiempo de vuelo entre los pulsos emitidos y los que se reciben al ser reflejados en el objeto [16].



**Figura 13. Sensores Ópticos de Presencia y Proximidad [16].**

## VII. Navegación:

### 1) Detección, evitación y planificación de caminos

La planificación y ejecución de caminos libres de obstáculos es una función de interés obvio en robótica debido a los requerimientos de seguridad de funcionamiento y fiabilidad. Mediante la detección de colisiones se trata de prever la posibilidad de una

colisión basándose en información sobre la posición del robot y los objetos en su entorno. Por lo que desde un punto de vista práctico, cabe distinguir entre la detección de colisión en una determinada dirección de movimiento, a partir de una medida de proximidad suministrada en tiempo real por un sensor. Posteriormente se implanta la función de evitación de colisiones en tiempo real, ya que una vez que se ha detectado una posible colisión se trata de generar acciones que permitan evitarla. En el caso más simple, consiste en disminuir la velocidad y realizar una parada, o generar un movimiento seguro. En el caso más complejo, se involucra una planificación local de movimientos, se trata de prever los efectos de realizar un determinado movimiento y realizar una planificación del camino más apropiado disponiendo de un modelo obtenido a partir de información previa del robot y su entorno, adquirida mediante el sistema sensorial [17].

El problema de la planificación de caminos libres de obstáculos suele formularse como sigue: dadas unas posiciones u orientaciones iniciales (S) y objetivo (G) del robot, se trata de generar un camino de S a G libre de obstáculos y eventualmente óptimo a ciertos criterios de funcionamiento. La planificación autónoma involucra siempre la función de detección de colisiones. En efecto, es necesario saber si la trayectoria del robot que se está considerando producirá colisión en un determinado espacio de trabajo [17].

Para determinar los conceptos de detección, evitación y planificación hay que distinguir entre: funciones en tiempo real durante la ejecución de movimientos, funciones que se realizan antes de iniciar el movimiento y funciones de ayuda de programación. Las primeras utilizan en tiempo real información de los sensores, deben realizarse con importantes restricciones temporales y de forma integrada en el controlador real de movimientos, de forma que los aspectos de sincronización y coordinación en tiempo real son importantes. En las segundas se necesita una cierta integración con el sistema de

control de movimientos en tiempo real, según una determinada arquitectura del sistema completo de control. Nótese que si el tiempo de ejecución de los sistemas de planificación y control son lo suficientemente rápidos, cabe suponer un ejecución continua de movimientos, sin necesidad de espera entre dos movimientos consecutivos. Por último mediante las funciones de ayuda se trata de establecer una herramienta para la programación de las operaciones del robot que facilite la tarea del programador mediante la detección de una colisión potencial de un movimiento programado, o incluso mediante la generación de caminos en entornos complejos que requieren mucho tiempo de programación [17].

La percepción de obstáculos y planificación de caminos libres de obstáculos deben contemplarse en sistemas de percepción y control de movimiento del robot. Para la percepción, debe contemplarse la incorporación de sensores para detección de colisiones, construcción de mapas y estimación del robot. Estos sensores deben ser pasivos (por ejemplo cámaras de video) o activos (por ejemplo, emisión de láser o ultrasonidos). Es claro que las características de la información suministrada tiene una gran influencia en los métodos que se empleen para la evitación de colisiones y planificación. De esta forma, mientras que para detectar la presencia de un obstáculo en una determinada dirección o direcciones de movimiento, en tiempo real, se necesita relativamente poca información, la construcción de modelos geométricos para planificación de caminos en tres dimensiones necesita un volumen importante y una gran cantidad de procesamiento. Aunque principalmente se considera la detección de obstáculos y la planificación de caminos, suponiendo también que los movimientos planificados se ejecutan mediante el controlador de forma eficiente, la consideración de las inevitables imprecisiones es muy importante para asegurar la fiabilidad del sistema. En la practica las funciones de percepción,

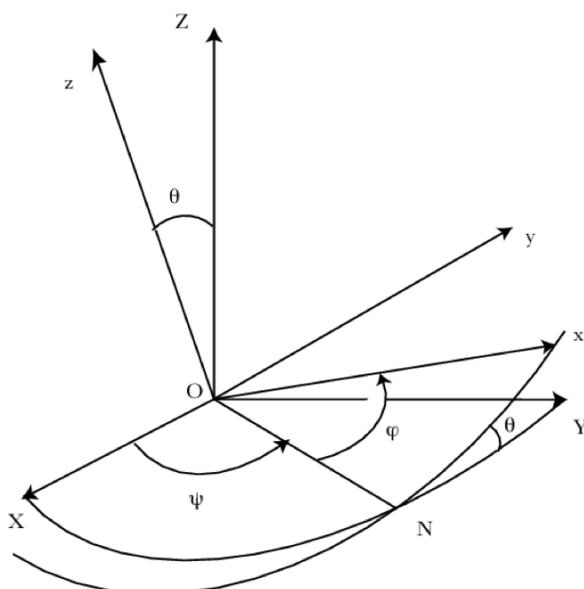
planificación y control de movimientos deben integrarse en una determinada arquitectura del sistema control [17].

## ***2) Planificación de la trayectoria***

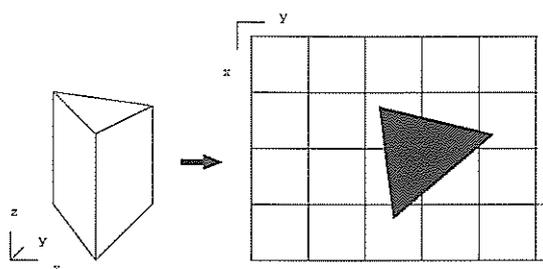
El planeamiento métrico o navegación cuantitativa utiliza métodos para dividir la trayectoria en sub-metas llamadas puntos de referencia. Estos puntos están en localizaciones fijas o en una coordenada  $(x,y)$ . Para que una ruta sea óptima debe considerar todas las rutas entre los puntos de referencia. Esto puede ser pesado para procesar pero existen algoritmos que facilitan estos métodos. Un camino óptimo no quiere decir que sea óptimo para el ojo humano, por ejemplo un camino óptimo realizado matemáticamente en un mundo dividido en grillas puede ser dentado o irregular antes que ser recto. La habilidad de producir y comparar posibles caminos también asume que el planeamiento tiene un mapa del mundo preexistente. Por lo que es importante que el mapa sea exacto y actualizado. Los planeadores de trayectoria métricos tienen dos componentes: la representación (estructura de datos) y el algoritmo. Los planeadores de trayectoria primero dividen el mundo en una estructura favorable para la planeación de la ruta. Se pueden utilizar una variedad de técnicas para representar el mundo, pero la más usada son las grillas regulares. Sin tomar en cuenta la técnica utilizada para representar el mundo su importancia es representar objetos relevantes en el espacio de interés. Los algoritmos pueden tener dos categorías los que tratan el planeamiento de ruta como un problema de búsqueda en el gráfico o los que tratan como un problema de colorear un gráfico. Esta estructura de planeación debe ser emparejada con la reacción del robot a distintos escenarios [18].

### **a. Espacio de configuración (Cspace)**

El espacio físico donde los robots y los obstáculos existen puede ser definido como el espacio del mundo. El espacio de configuración (Cspace) es una estructura de datos que permite al robot especificar la posición (localización y orientación) de cualquier objeto y el robot. Una buena representación del Cspace reduce el número de dimensiones con las que el planeador debe lidiar. Si se considera que se necesita seis dimensiones (seis grados de libertad) para representar donde está un objeto. Por lo que se necesitan las coordenadas del marco de referencia (x, y, z) adicionalmente se utilizan los ángulos de Euler  $\Phi$ ,  $\theta$ ,  $\Upsilon$ , mostrados en la figura 14, también conocidas como dirección, elevación, ángulo de alabeo. Seis grados de libertad es más de lo necesario para un robot móvil en el suelo para la mayoría de casos de planeamiento de ruta. La coordenada z puede ser eliminada si todos los objetos del robot están en el piso. Así mismo se puede obviar los ángulos de Euler posiblemente el único útil sea el de dirección para el caso de un robot móvil en un terreno plano. La figura 15 muestra la transformación de un objeto al Cspace. En general para algoritmos de planeamiento de rutas métricas se utilizan solo dos dimensiones. Ya que para el planeamiento el robot puede ser modelado como circular para que la orientación no importe. Esto asume que el robot es holonómico, lo que significa que puede girar en un mismo puesto [18].



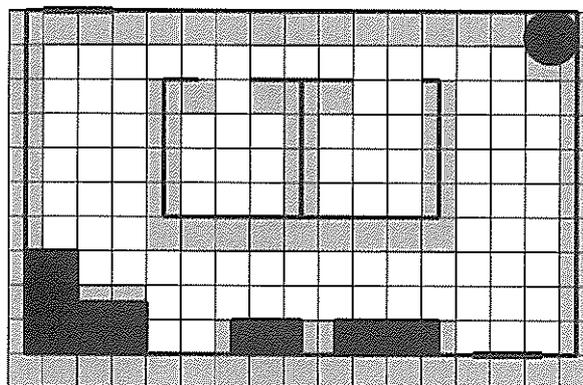
**Figura 14. Angulos de Euler  $\Phi$ ,  $\theta$ ,  $Y$  [18].**



**Figura 15. Reducción del espacio del mundo de seis grados de libertad al espacio de configuración de dos grados de libertad [18].**

Existen varias formas de representar el Cspace, generalmente las representaciones difieren en la forma de dividir el espacio libre. Cualquier espacio abierto no ocupado por un objeto es un espacio libre, donde el robot es libre de moverse sin golpearse contra nada modelado en el Cspace. Así mismo cada división puede tener información adicional, como el tipo de terreno u otras limitaciones. Podemos utilizar un grilla regular lo que significa superponer una grilla 2D en el espacio del mundo, como se muestra en la figura 16. Si hay algún objeto en el área contenida por un elemento de la grilla éste es considerado ocupado, por lo

que este tipo de grillas suele llamarse grilla de ocupación. El centro de cada elemento en la grilla es un nodo, los cuales pueden ser 4-conexiones u 8-conexiones dependiendo si permite hacer un arco entre nodos diagonalmente o no. Se deben considerar que si un objeto está parcialmente en un elemento de la grilla está se marca como ocupada, resultando en gasto de espacio y objetos dentados. Para evitar esto las grillas se dividen en muchas partes, resultando en un alto costo de almacenamiento y un número alto de nodos que debe considerar el algoritmo de planeamiento de la ruta [18].

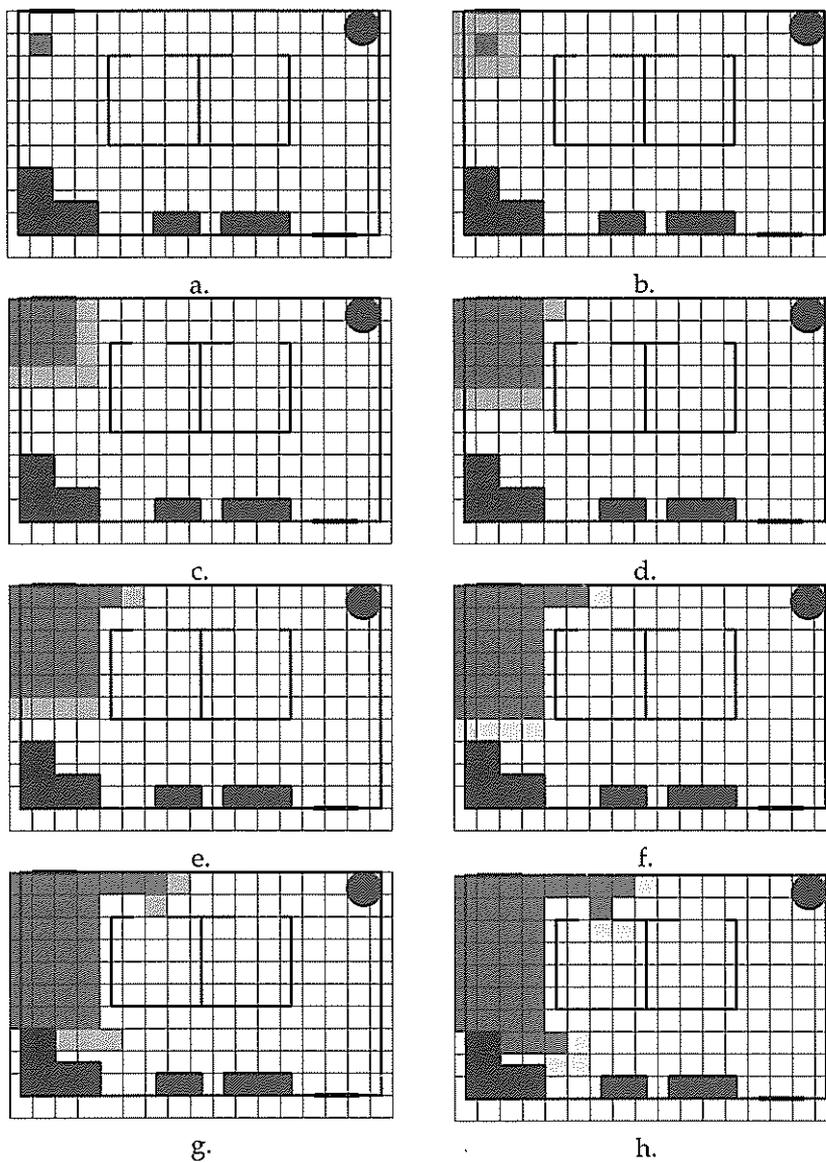


**Figura 16. Grilla Regular [18].**

#### **b. Planeadores basados en propagación de onda**

Llamado Wavefront Propagation su principio es considerar el Cspace un material conductivo con radiación de calor desde el nodo inicial al nodo de meta. Eventualmente el calor se expandirá y llegara a la meta si hay un camino, como se puede ver en la secuencia de la figura 17. Cabe recalcar que el camino óptimo de todos los elementos de la grilla a la meta puede ser computada como un resultado adicional, ya que el resultado será un mapa que se ve como un campo potencial. Existe el algoritmo de Trulla el que utiliza el campo potencial para que el robot lo utilice directamente para encontrar la ruta, como una observación de un sensor. Una ventaja de este planeador es como trata el tipo de terrenos, se puede modelar un obstáculo como conductividad 0.0 o una área abierta con

conductividad infinita. Pero terrenos no deseables se les puede dar una baja conductividad. Lo que significa que el algoritmo usará un camino mas largo pero con terrenos deseables y no caminos mas cortos por terrenos indeseables.



**Figura 17. Una onda propagándose por una grilla regular [18].**

### **3) Detección de obstáculos**

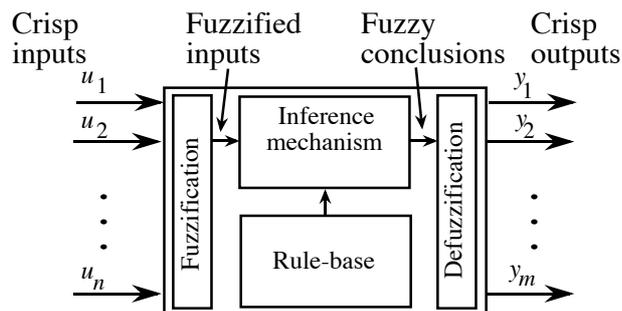
Para la detección y evitación de obstáculos se debe utilizar un sistema de control que permita cierta adaptabilidad para poder procesar los datos de los sensores y para tomar una decisión acorde a la información. La lógica fuzzy permite realizar decisiones en tiempo real y puede ser definido de acuerdo al robot y a su ambiente. Lo que hace este método muy eficiente para evitar obstáculos.

#### **a. Sistemas Fuzzy**

Un sistema fuzzy es un mapeo estático no lineal, entre las entradas y las salidas. Se asume que el sistema fuzzy tiene entradas  $u_i$  que pertenece a  $U_i$  donde  $i = 1, 2, \dots, n$  y salidas  $y_i$  que pertenece a  $Y_i$  donde  $i = 1, 2, \dots, m$  como se muestra en la figura 18. Las entradas y salidas sin procesar son números reales no conjuntos fuzzy. El bloque de fuzzificación convierte las entradas sin procesar a conjuntos fuzzy, luego el mecanismo de inferencia utiliza las reglas fuzzy de la base de reglas para producir decisiones fuzzy, y la defuzzificación convierte las decisiones fuzzy en salidas para la planta en este caso el robot [19].

#### **i. Universo de discurso**

El conjunto ordinario  $U_i$  e  $Y_i$  son llamados universos de discurso para  $u_i$  e  $y_i$  respectivamente, en otras palabras su dominio. En aplicaciones prácticas los universos de discurso son simplemente los conjuntos de números reales o algún intervalo o un subconjunto de números reales. Por conveniencia se puede utilizar un universo de discurso efectivo  $[\alpha, \beta]$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los puntos límite, el ancho de universo de discurso [19].



**Figura 18. Sistema Fuzzy [19].**

## ii. Variables Lingüísticas

Para especificar la base de reglas, se utiliza una descripción lingüística por lo que se necesitan expresiones lingüísticas para las entradas y salidas del sistema fuzzy. Para el sistema fuzzy las variables lingüísticas definidas por  $\tilde{u}_i$  se utilizan para describir entradas  $u_i$  así mismo las variables lingüísticas definidas por  $\hat{y}_i$  son usadas para describir las salidas  $y_i$  [19].

## iii. Valores Lingüísticos

Así como  $u_i$  e  $y_i$  son valores en el universo de discurso  $U_i$  e  $Y_i$  respectivamente, las variables lingüísticas  $\tilde{u}_i$  e  $\hat{y}_i$  utilizan valores lingüísticos para describir éstas. Si  $\tilde{A}_i^j$  define el valor lingüístico  $j$  de la variable lingüística  $\tilde{u}_i$  definida en el universo  $U_i$ . Si se asume que existen varios valores lingüísticos sobre  $U_i$  entonces la variable lingüística  $\tilde{u}_i$  utiliza los elementos del conjunto lingüístico de valores definido por:  $\tilde{A}_i = \{\tilde{A}_i^j : j = 1, 2, \dots, N_i\}$ . Así mismo si  $B_i^j$  define el valor lingüístico  $j$  de la variable lingüística  $\hat{y}_i$  definida en el universo de discurso  $Y_i$ , la variable lingüística  $\hat{y}_i$  usa elementos del conjunto de valores lingüísticos  $B_i = \{B_i^j : j = 1, 2, \dots, M_i\}$ . Los valores lingüísticos son generalmente términos descriptivos como “positivo largo”, “cero”, “negativo grande” [19].

#### iv. Reglas Lingüísticas

El mapeo de las entradas a las salidas del sistema fuzzy es en gran parte caracterizado por un conjunto de reglas de condición  $\rightarrow$  acción, es decir de la forma Si *premisa* entonces *consecuencia*. Por lo que las entradas del sistema fuzzy están asociadas a la premisa y las salidas a la consecuencia. Si se considera un sistema de múltiples entradas y una salida (MISO) la regla lingüística seria: Si  $\tilde{u}_1$  es  $\tilde{A}^1_1$  y  $\tilde{u}_2$  es  $\tilde{A}^k_2$  y ..... y  $\tilde{u}_n$  es  $\tilde{A}^n_n$  entonces  $\hat{y}_q$  es  $B^p_q$ . Es un conjunto completo de reglas lingüísticas de esta forma que especifican como controlar un sistema [19].

#### v. Función de Membresía

Los conjuntos fuzzy y la lógica fuzzy es utilizada para cuantificar heurísticamente el significado de las variables lingüísticas, los valores lingüísticos y las reglas lingüísticas. El concepto de conjunto fuzzy es introducido primero definiendo la función de membresía. Si  $U_i$  define el universo de discurso y  $\tilde{A}^j_i$  define un valor lingüístico para la variable lingüística  $\tilde{u}_i$ . La función  $\mu(\tilde{u}_i)$  asociada con  $\tilde{A}^j_i$  que mapea  $U_i$  a un rango de  $[0, 1]$  esta es llamada la función de membresía. La función de membresía describe qué tan certero es un elemento de  $U_i$  definido por  $u_i$  con una descripción lingüística  $\tilde{u}_i$  que será clasificado lingüísticamente por  $\tilde{A}^j_i$  [6]. Se puede deducir que se pueden utilizar muchas figuras para la función de membresía (triangular, trapezoidal) y cada uno de estos provee un diferente significado a los valores lingüísticos que son cuantificados. La caracterización matemática de la función de membresía triangular es la siguiente:

**Cuadro 2: Caracterización matemática de la función de membresía triangular [19].**

Triangular membership functions	
Left	$\mu^L(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u \leq c^L \\ \max \left\{ 0, 1 + \frac{c^L - u}{0.5w^L} \right\} & \text{otherwise} \end{cases}$
Centers	$\mu^C(u) = \begin{cases} \max \left\{ 0, 1 + \frac{u - c}{0.5w} \right\} & \text{if } u \leq c \\ \max \left\{ 0, 1 + \frac{c - u}{0.5w} \right\} & \text{otherwise} \end{cases}$
Right	$\mu^R(u) = \begin{cases} \max \left\{ 0, 1 + \frac{u - c^R}{0.5w^R} \right\} & \text{if } u \leq c^R \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$

### vi. Lógica Fuzzy

La intersección fuzzy (and) define los conjuntos fuzzy  $\tilde{A}_i^1$  y  $\tilde{A}_i^2$  que esta definido en el universo de discurso  $U_i$ , es un conjunto fuzzy descrito por  $\tilde{A}_i^1 \cap \tilde{A}_i^2$  con una función de membresía definida por el mínimo de los dos valores de membresía  $u_{\tilde{A}_i^1 \cap \tilde{A}_i^2} = \min \{u_{\tilde{A}_i^1}(u_i), u_{\tilde{A}_i^2}(u_i), u_i \in U_i\}$  [19].

### vii. Fuzzificación

Los conjuntos fuzzy se utilizan para cuantificar la información en la base de reglas, por lo que se tiene que especificar cómo un sistema fuzzy va a convertir las entradas numéricas  $u_i$  a conjuntos fuzzy para que puedan ser utilizados. Si  $U_i^*$  define todos los conjuntos fuzzy posibles que pueden ser definidos en  $U_i$ . Dado un  $u_i$  que pertenece a  $U_i$ , la fuzzificación transforma éste a un conjunto fuzzy definido por  $\hat{A}_i^{\text{fuz}}$  definido en el universo de discurso  $U_i$ . Generalmente se utiliza la fuzzificación singleton (simple) la que produce un conjunto fuzzy  $\hat{A}_i^{\text{fuz}} \in U_i^*$  con una función de membresía definida por

$$u_{\hat{A}_i^{\text{fuz}}}(x) = \begin{cases} 1 & x = u_i \\ 0 & \text{otro} \end{cases} \quad (\text{Ec.27})$$

El conjunto fuzzy singleton da una diferente representación al número  $u_i$ , esta implementación se utiliza ya que sin la presencia de ruido, es seguro que  $u_i$  utiliza el valor medido [19].

### viii. Mecanismo de Inferencia

El mecanismo de inferencia tiene dos tareas, (1) determinar qué tan relevante es cada regla para la actual situación caracterizada por la entradas  $u_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  (a esto se lo llama tarea de correspondencia); y (2) concluir usando las entradas actuales  $u_i$  y la información de la base de reglas (tarea de inferencia) [19].

**Tarea de Correspondencia:** Si se supone que se tiene las entradas  $u_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  y la fuzzificación produjo  $\hat{A}^{\text{fuz}}_1, \hat{A}^{\text{fuz}}_2, \dots, \hat{A}^{\text{fuz}}_n$  que son los conjuntos fuzzy que representan las entradas. Hay dos pasos para la correspondencia, primero se debe encontrar conjuntos fuzzy  $\hat{A}^{\text{fuz}}_1, \hat{A}^{\text{fuz}}_2, \dots, \hat{A}^{\text{fuz}}_n$  con funciones de membresía del tipo:

$$u_{\hat{A}_n^i}(u_n) = u_{A_n^i}(u_n) * u_{\hat{A}_n^i}(u_n) \quad (\text{Ec.28})$$

La ecuación 17 combina los conjuntos fuzzy de la fuzzificación con los conjuntos fuzzy utilizados en cada termino de las premisas de las reglas. Si se usa fuzzificación singleton entonces cada uno de estos conjuntos fuzzy es un singleton que esta escalado por la premisa de la función de membresía. Lo que significa que se tiene:

$$u_{\hat{A}_n^{\text{fuz}}}(u_i) = 1 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \text{ para un } u_i \text{ de tal forma que}$$

$$u_{\hat{A}_n^i}(u_n) = u_{A_n^i}(u_n) \quad (\text{Ec.29})$$

Segundo, se forman valores de membresía  $u_i(u_1, u_2, \dots, u_n)$  para la regla  $i$  de la premisa que representa la certeza que cada regla tiene para las entradas:

$$\mu_i(u_1, u_2, \dots, u_n) = \mu_{A_1^j}(u_1) * \mu_{A_2^k}(u_2) * \dots * \mu_{A_n^l}(u_n) \quad (\text{Ec.30})$$

Se utiliza  $u_i(u_1, u_2, \dots, u_n)$  para representar la certeza de que una premisa de la regla  $i$  corresponde con la información de entrada cuando usamos fuzzificación singleton.

**Tarea de inferencia:** Se procesa para la regla  $i$  el conjunto fuzzy implicado  $B_q^i$  con una función de membresía

$$\mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) = \mu_i(u_1, u_2, \dots, u_n) * \mu_{B_q^i}(y_q) \quad (\text{Ec.31})$$

El conjunto fuzzy implicado  $B_q^i$  el nivel de certeza que una salida debe ser una salida específica sin procesar  $y_q$  dentro del universo de discurso  $Y_q$  tomando en consideración la regla  $i$  [19].

### ix. Defuzzificación

Es el medio para elegir una sola salida definida por  $y_q^{\text{crisp}}$  basada en los conjuntos fuzzy implicados  $B_q^i$ . Si utilizamos el centro de gravedad (COG) la salida sin procesar  $y_q^{\text{crisp}}$  se elige usando el centro de área y el área de cada conjunto fuzzy implicado y está dado por:

$$y_q^{\text{crisp}} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \int_{Y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q}{\sum_{i=1}^R \int_{Y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q} \quad (\text{Ec.32})$$

*Donde  $R$  es el número de reglas,  $b_i^q$  es el centro de área de la función de membresía de  $B_q^i$  para la  $i$  regla.*

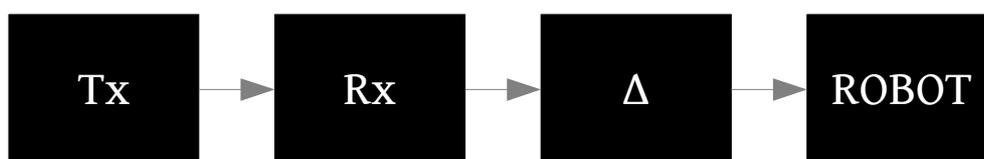
La integral de la ecuación 33 define el área bajo la función de membresía:

$$\int_{Y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q \quad (\text{Ec.33})$$

[19]

## Desarrollo

Para poder alcanzar los objetivos predispuestos para esta tesis, se dividió todo el proyecto en secciones diferentes, pero de igual importancia cada una. Para la sección concerniente a la determinación de la posición, hemos catalogado cada etapa mediante su función individual; y por su función dentro del sistema de localización. El sistema de localización, cuyo esquema se muestra en la Figura 17, inicia con una etapa transmisora que esta compuesto por dos módulos diferentes. El primero módulo se encarga de emitir información de sincronización por medio de radiofrecuencia hacia el receptor; mientras que, el segundo módulo emite un pulso de ultrasonido inmediatamente después de que termina la emisión de radiofrecuencia del primer módulo. La segunda etapa inicia con la recepción de los bytes de sincronización enviados por el primer módulo seguido de la medición del tiempo en que toma llegar el pulso de ultrasonido, emitido por el segundo módulo, a un receptor ultrasónico. La tercera etapa consiste en la adquisición de los pseudorángos a utilizar para la trilateración; y finalmente, la etapa de comunicación entre el PIC del receptor y el ARDUINO que controla el robot.

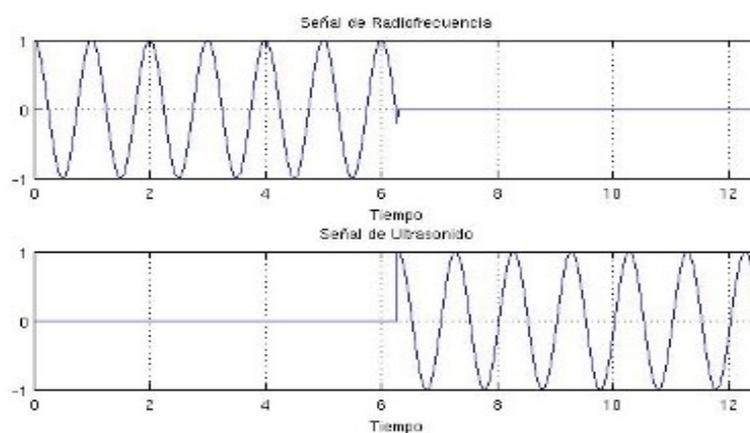


**Figura 19: Esquema General del Sistema de Localización. Fuente: Esquema LibreOffice.**

A continuación el robot móvil, con los datos de posicionamiento, empezara el proceso de tomar una ruta por medio del planeador de trayectoria, y a la vez tomara en cuenta si existe algún obstáculo que será detectado por medio del sistema de evitación de obstáculos, todo esto será aplicado por medio de un control proporcional. Esto será logrado por medio de la implementación mecánica y electrónica, y la aplicación de los algoritmos.

## I. Diseño del transmisor del sistema de posicionamiento

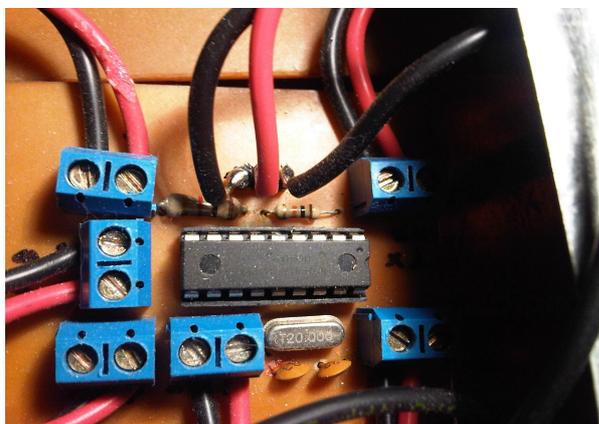
La etapa de transmisión, como se mencionó anteriormente, consiste en la emisión de señales de radiofrecuencia y ultrasonido con la finalidad de enviar al receptor la información necesaria para así; poder estimar la posición. La transmisión esta compuesta por dos partes o módulos que, trabajan de manera cíclica y cuyo objetivo es mantener la sincronización entre los transmisores de ultrasonido y un receptor, también de la misma naturaleza. El ciclo de trabajo que los módulos realizan esta guiado por un PIC ubicado en el módulo de radiofrecuencia que controla el “timing” entre la emisión de datos y la emisión del pulso de ultrasonido. El “timing” es de vital importancia en el sistema ya que, mantiene al receptor en sincronización con los módulos de radiofrecuencia y de ultrasonido. Por ejemplo, cuando el transmisor de radiofrecuencia envía información validando al receptor; este envía un pulso que activa un transmisor de ultrasonido el cual es responsable de emitir la señal sonora inmediatamente después de que la trama de radiofrecuencia haya acabado, ver Figura 18.



**Figura 20: Timing de emisión de radiofrecuencia y ultrasonido. Obs.: La gráfica no se encuentra en la escala apropiada; solo muestra la sincronización de transmisión en las dos señales. Fuente: Gráfica MATLAB.**

### 1) Módulo de Radiofrecuencia - Transmisor

El módulo de radiofrecuencia, que se muestra en la Figura 19, contiene, como unidad de control, un PIC16F84a responsable de enviar los bytes de información en una trama específica hacia un dispositivo de modulación ASK. Este dispositivo (ver Figura 20) puede enviar bits a no más de una velocidad de 4.8 Kbps, lo cual no es un problema ya que solo se necesita que la trama llegue de manera fiable al receptor. Sin embargo, el dispositivo de modulación ASK no tiene un protocolo de comunicación intrínseco; es decir, envía la información sin ningún protocolo, lo cual se refleja en la falta de fiabilidad entre los datos recibidos y enviados. Por lo tanto, para mejorar la fiabilidad en la comunicación, es necesario crear un protocolo que asegure la recepción de los datos; y elimine los datos falsos introducidos por el ruido.



**Figura 21: Circuito del transmisor de radiofrecuencia. Fuente: Montaje Final.**



**Figura 22: Transmisor de radiofrecuencia ASK a 433 MHz. Fuente: Montaje Final.**

**a. Protocolo de Comunicación**

El protocolo a usar está dividido por dos partes esenciales en las comunicaciones inalámbricas, las cuales son: el preámbulo y los datos, o información en sí. El preámbulo, dentro de la trama, cumple con la función de validar al receptor y asegurar que la información recibida sea verdadera y no producto del ruido u otros fenómenos. Por ejemplo, si la trama a enviar contiene como preámbulo un carácter ASCII "Z", seguido de la información; el receptor comprueba que la información recibida comience con "Z" para poder obtener y almacenar los demás datos. Ver Figura 21. Por otro lado, si la trama recibida no comienza con "Z"; el receptor no valida la información, y en consecuencia ignora los bits a recibir.



**Figura 23: Esquema de la trama de comunicación. El preámbulo "Z" es validado por el receptor, mientras que, el preámbulo @ no es aceptado.**

La información que contiene la trama ayuda a la identificación de cada emisor de ultrasonido. Por este motivo, se ha llamado a cada emisor como satélite debido a que estos van a proporcionar la variable a medir para poder estimar la posición.

**b. Escritura de Datos**

El PIC16F84a, que se encuentra en el módulo de radiofrecuencia, envía los

bits en un protocolo serial 8N1; es decir, 8 bits de información con un bit de parada para establecer la comunicación. La escritura de la comunicación serial viene dada por default en el lenguaje de programación de PICBASIC PRO y es enviada por un puerto hacia el dispositivo de RF, como última etapa. Como se mencionó anteriormente, la trama esta formada por un preámbulo “Z” y la identificación del satélite, y es por este motivo que, el PIC envía encapsulado tanto el preámbulo como la información. Sin embargo, se puede pensar que la escritura de los datos viene concatenada; y de igual forma, PICBASIC PRO también lo ve de esta manera. Por lo tanto, basta con una concatenación de datos para enviar información de acuerdo a la trama establecida. Ver Figura 22.

```
SEROUT2 TX, 16572, ["Z",DATO]
```

**Figura 24: Línea de código de transmisión serial en PICBASIC PRO.**

La función SEROUT2 es un comando nativo de PICBASIC PRO capaz de enviar información a velocidades menores de 9.6 kps. El número que aparece en la Figura 22, “16572” establece la configuración de la tasa de baudios y la estructura del protocolo; en este caso, 8N1 a 4.8 Kbps [10]. Finalmente, los datos a escribir se colocan entre corchetes separados mediante una coma (,) la cual no se imprime, pero cumple el trabajo de separar los caracteres.

### ***c. Interfaz Radiofrecuencia y Ultrasonido***

La interfaz, entre las partes de radiofrecuencia y ultrasonido que componen el módulo transmisor, es la pieza fundamental para mantener la congruencia entre los datos enviados por radiofrecuencia y la activación del transmisor de ultrasonido correspondiente. Cada transmisor de ultrasonido tiene una identificación específica y una localidad determinada que evita la adquisición ambigua.

#### ***d. Identificación de satélites***

Los transmisores de ultrasonido, o satélites, están identificados por un entero específico que cumple dos funciones primordiales en el sistema. La primera función es dar a conocer la posición espacial del satélite; y la segunda función, es la de establecer la congruencia entre los datos que son adquiridos y el sistema de ecuaciones estimador de posición. El sistema goza de cinco satélites que se encuentran identificados de la siguiente manera: Este (1), Centro(2), Norte(7), Oeste(3) y Sur (4). Estos identificadores son enviados del PIC hacia el dispositivo de radiofrecuencia para su envío. De esta manera, cumpliendo el protocolo de comunicación, el receptor inicia la etapa de adquisición tomando en cuenta la posición relativa del satélite que emita la señal de ultrasonido.

#### ***e. Activación de Satélites***

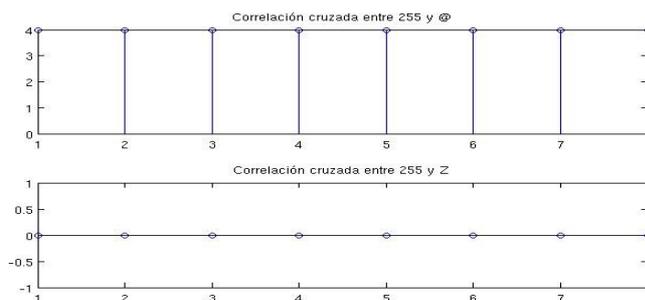
Los módulos transmisores de ultrasonido se encuentran inicialmente apagados. Esta condición inicial es de suma importancia ya que, no se puede tener los módulos de sonido emitiendo señales al mismo tiempo. Sin embargo, si los satélites se encuentran encendidos, todos al mismo tiempo, la señales emitidas formarían un patrón de interferencias en el espacio de búsqueda creando zonas en donde existen interferencias destructivas. Por este motivo, los satélites se encienden de manera sincrónica, específicamente después de que, los identificadores de los satélites sean enviados por radiofrecuencia. Ver Figura 25 en Anexo A.

Los pulsos de activación de los satélites tiene una duración de 2 ms, el cual es suficiente para expandir la onda sonora a todos los alrededores; cubriendo así más área. Cada pulso es enviado por diferentes puertos del PIC hacia la entrada de los módulos de ultrasonido.

### ***f. Tiempo de espera y sincronización***

Cuando la onda sonora se propaga por el aire, esta toma cierta cantidad de tiempo en viajar hacia su objetivo. Sin embargo, tal escenario no se cumple en la práctica. La onda de sonido enfrenta varios comportamientos según la naturaleza del medio; es decir, puede que la onda sea refractada, o reflejada. Es por este motivo que, para evitar los errores en la adquisición, el PIC envía “datos de relleno” que no validan al receptor. De esta manera, se tiene un tiempo de espera, lo suficientemente largo, que elimina los rebotes provocados por obstáculos. El tiempo de espera queda definido por el número de bits y la tasa de baudios. En este caso, la tasa de baudios es de 4.8K Kbps y se envían 32 bytes de datos que dan como resultado 60 ms; tiempo suficiente para que la onda sonora se haya propagado completamente [11].

Los “datos de relleno” tienen el mismo formato 8N1 serial; sin embargo, no tienen el preámbulo “Z” como cabecera. El valor de dato enviado fue escogido de tal manera de que, no exista una correlación entre el preámbulo y el dato. La elección del mejor “dato de relleno” evitará errores en la comunicación inalámbrica. Como se muestra en la Figura 23, el mejor dato de relleno, que no se encuentra correlado con el preámbulo “Z”, es el “255”. Así que, este dato se repetirá lo suficiente para cumplir con el tiempo de espera establecido.



**Figura 26: Correlación cruzada entre los datos de preámbulo Z y los “Datos de relleno”.**  
**Obs: La gráfica no se encuentra en escala**

## 2) Módulo de Ultrasonido Transmisor

El módulo de ultrasonido esta compuesto por dos secciones complementarias. La primera contiene el corazón del transmisor, el cual es el oscilador; y la segunda, es la parte amplificadora de potencia que ayudará a la onda sonora a propagarse con mayor energía.

### a. Oscilador

La onda de ultrasonido, que se usa en los transductores de uso comercial, tiene una frecuencia nominal de 40KHz para su operación. Por esta razón, el motor del módulo de ultrasonido es un temporizador N555 en modo “astable ” que sirve para poder hacer oscilar a la frecuencia deseada.

El modo “astable” nace de su comportamiento variante en el tiempo; es decir, la salida del temporizador cambia de estado de acuerdo a la carga y descarga de los puertos de N555 [12]. En el modo “astable”, la frecuencia de oscilación se puede calcular mediante la Ecuación 34 -(a).

$$F = \frac{1.4}{[(R_1 + R_2) C_1]} \quad (\text{Ec.34 -a})$$

$$T = T_m + T_s \quad (\text{Ec.34 -b})$$

$$T_m = 0.7(R_1 + R_2) C_1 \quad (\text{Ec.34-c})$$

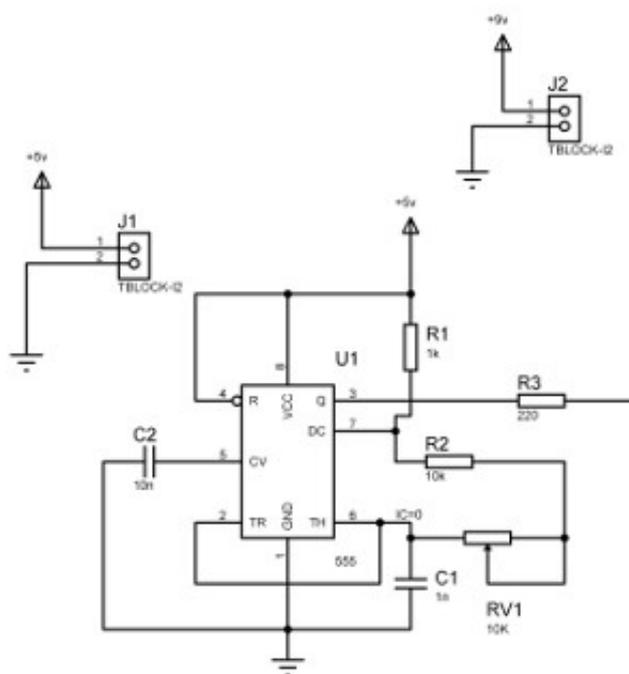
$$T_s = 0.7R_2 C_1 \quad (\text{Ec.34 -d})$$

Donde R1,R2 son Resistencias (Ohms) y C1 es un capacitor (Faradios)

Para poder tener una oscilación estable con un duty cycle del 50% es necesario ajustar los valores de las resistencias de tal manera que Tm y Ts sean de igual valor.

Para poder lograrlo, el valor de R1 tiene que ser cercano a cero, o tiene que ser muy

pequeño en comparación con R2. Sin embargo, debido a que los márgenes de error de los componentes corresponden al 10% del valor nominal; obtener una frecuencia exacta dependerá de los componentes. Por otro lado, este problema se solucionó mediante el uso de un potenciómetro de precisión que se puede manipular para obtener resultados más acertados. El valor de potenciómetro es de 10K conjuntamente con una resistencia de 10K que corresponde al valor de resistencia R2 y el valor de R1 correspondería a 1K. Estos valores dejan por consiguiente un valor de capacitor de 1nF; como se muestra en el circuito de la Figura 27

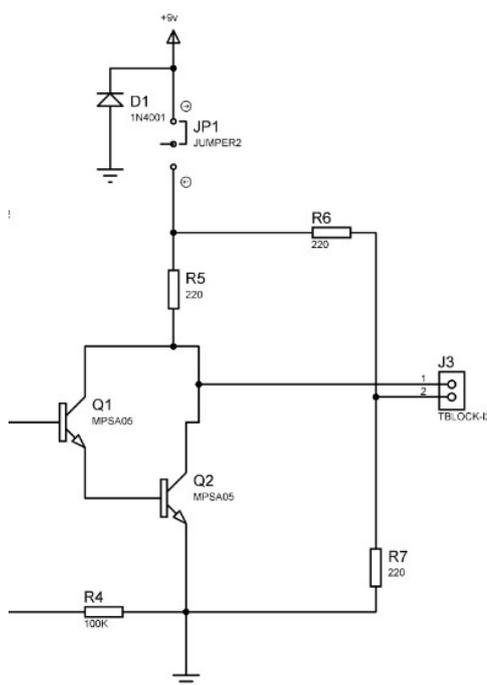


**Figura 27: Configuración de temporizador en modo de oscilador. Fuente: Diseño Final de tesis.**

### ***b. Amplificador de potencia***

La segunda etapa del transmisor de ultrasonido corresponde a la etapa amplificadora. La señal del oscilador, que sale del temporizador, entra en una configuración Darlington de transistores. La configuración Darlington es una conexión entre emisor y base de dos transistores bipolares de juntura (BJT). La

amplificación de corriente es producida por la multiplicación del factor  $\beta$  de cada uno de los transistores[21]. El factor de  $\beta$  dependerá del voltaje entre el colector base; sin embargo, la configuración solo actuará cuando los transistores se encuentren en corte o saturación según la señal entrante. Como resultado, la corriente se amplificará de tal manera que la energía se disipa en el transductor, que se puede considerar como un componente resistivo. Para eliminar la componente de DC de la polarización de los transistores, la señal de salida de colector es conectada a un pin de un transductor; mientras que, el segundo pin se conecta a un divisor resistivo R6 y R7 conectado a la fuente. Ver Figura 28.

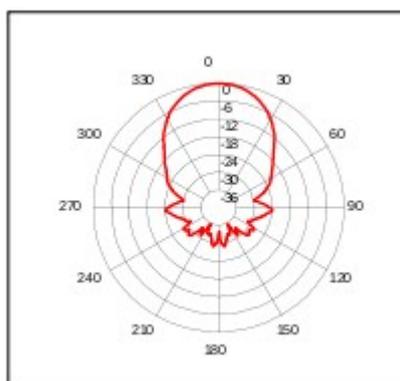


**Figura 28: Amplificador de corriente en configuración Darlington. Fuente: Diseño final de tesis.**

### ***c. Radiación de ultrasonido***

Los transductores de ultrasonido no emiten una señal radial. El patrón de radiación del transductor tiene una naturaleza direccional ya que, usualmente los

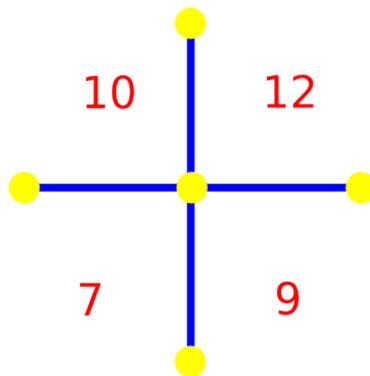
transductores se utilizan en robótica para la detección de objetos cercanos. Ver Figura 29. Este patrón de radiación resulta un problema si se quiere cubrir mayor área; sin embargo, una buena distribución de transductores puede resolver el problema de cobertura.



**Figura 29: Lóbulo de radiación de transductor de ultrasonido. Fuente: Datasheet 3004 Transducer.**

#### *d. Distribución de los satélites*

Los satélites, que componen el sistema, están distribuidos de manera que sea posible trilaterar según la Ecuación 11. Sin embargo, nuestro sistema no solo cuenta con tres satélites. Es más, el sistema goza de cinco satélites en total que delimitan cuadrantes en un plano cartesiano como se muestra en la Figura 30. La distancia máxima que existe de separación entre los satélites no excede el valor de 1.60 cm. Esta condición nace de la necesidad de conseguir una mayor cobertura empleando transductores con lóbulos de radiación directivos. Si la separación de los satélites no excede este valor, las ondas sonoras cubren el espacio suficiente para la adquisición; y la trilateración dependerá de la identificación de los satélites.



**Figura 30: Distribución de los satélites (esferas amarillas). Cada cuadrante del plano cartesiano es identificado por los enteros mostrados en esta figura.**

## II. Diseño del receptor del sistema de posicionamiento

La etapa de recepción del sistema es la responsable de adquirir la información de identificación y medición de la señal de ultrasonido. La recepción inicia con la validación de los identificadores dentro de la trama de comunicación; dando paso a la parte adquisitiva del receptor constituida por un contador de 16 bits. El contador inicia con valor de cero y va aumentando a cierta velocidad para poder medir el tiempo en que, la señal de ultrasonido emitida por los satélites llegaran al módulo receptor US para su amplificación y envío hacia el módulo de radiofrecuencia del receptor.

### 1) Módulo de radiofrecuencia - Recepción

El módulo de radiofrecuencia esta conformado por un dispositivo de recepción ASK y un PIC16F84a para su control. La información que recibe el dispositivo ASK tiene la misma velocidad de 4.8Kbps del transmisor y el mismo protocolo de comunicación. No existen muchas diferencias, a nivel de hardware, entre el módulo transmisor y el módulo receptor de RF. La diferencia esta en el tipo de tareas que realizan dentro del sistema. La funcionalidad de este módulo cumple con la validación de los satélites y la medición del tiempo de llegada de la señal sonora.

### **a. Validación**

La validación de los satélites se obtiene mediante la aceptación del preámbulo “Z” que se enviá antes de los datos reales. Sin embargo, a nivel de hardware del PIC16f84a, los pines no gozan de una estructura independiente USART, por lo que la información que llega al pin se pierde si esta no esta en modo de lectura serial. Para mantener enlazado el receptor; es decir, para que no pierda información, se utilizó una sentencia nativa de PICBASIC PRO que es capaz de leer continuamente el puerto hasta encontrar un calificador. Este calificador, en nuestro caso, es el preámbulo “Z”. Ver Figura 31.

```
SERIN2 RX,16572,[ WAIT("Z"), NUMERO]
```

**Figura 31: Línea de código de recepción serial en PICBASIC PRO.**

Cuando la información llega hacia el pin de recepción del PIC, la función SERIN2 comienza a leer bit por bit hasta identificar los primeros bytes, donde comienza la comparación entre el calificador establecido y la información entrante. Solo cuando el primer byte recibido es igual a Z; se comienza a almacenar los datos que sigue en la trama de la Figura 23. Si la información entrante al PIC no empieza con “Z”, entonces la función se llama a si mismo para leer el puerto hasta que el calificador sea aceptado.

### **b. Vector de Satélites**

Después de que los datos recibidos por el PIC son validados, la etapa de registro de identificativo comienza. Estos registros son almacenados en un vector de enteros llamado vector de satélites. El vector de satélites guarda los identificadores de los satélites que llegan del módulo de radiofrecuencia hacia el PIC. El objetivo de tener un vector de satélites es la de llevar un registro completo

del origen de las señales de ultrasonido y así; poder identificar el conjunto de ecuaciones que coincidan con las posiciones relativas de los transmisores de ultrasonido activados. Ver Figura 32.

$$\text{INDICE}[I] = \text{NUMERO}$$

**Figura 32: Almacenamiento de cuantificadores pertenecientes a los satélites.**

El vector de satélites tiene una longitud de 3 elementos ya que; para poder estimar la posición, solo se necesita poseer tres datos de adquisición.

### ***c. Interrupciones***

Al finalizar la emisión de los datos de radiofrecuencia, el receptor habilita una interrupción global que sirve para poder determinar cuando el pulso de ultrasonido ha llegado al receptor. La interrupción global configura al PIC para que sus pines del puerto B sea sensible al cambio de estado y se activa mediante el bit 7 del registro INTCON. Sin embargo, no todos los pines actúan como fuentes de interrupción. En el diseño, el puerto de entrada B4 sirve como fuente de interrupción y se activa mediante el bit 3 del registro INTCON del PIC [13]. Por ejemplo: INTCON = %10101000. De esta manera, el PIC mantiene encendida las interrupciones globales producidas por el cambio de estado de los pines 4 a 7 del puerto B[13].

### ***d. Temporizador de 16 bits***

El PIC16F84a no tiene en su estructura un contador de 16 bits netamente en hardware; solo tiene un contador de 8 bits para varios usos. Sin embargo, si se define en PICBASIC PRO una variable del tipo WORD, entonces el temporizador queda definido por la suma de los registros en tiempos discretos. Para poder

lograrlo, se utilizó una máquina de estados controlado por una bandera de interrupción que nace de la llegada del pulso de ultrasonido. De esta manera, el temporizador comienza a contabilizar el tiempo en que toma en llegar la señal sonora. El tiempo en que el temporizador aumenta está dado por el tiempo en que toma ejecutar las instrucciones y el salto del Stack del PIC [13]. Sin embargo, debido a que se tiene un oscilador de 20MHz, el tiempo de instrucciones totales no sobrepasa los 10us dejando así; ajustar el tiempo de muestreo del temporizador. El valor del tiempo establecido para el muestreo del temporizador es de 11,5us; el cual se ajusta al formato 8 bits enteros y 8 bits decimal. Por ejemplo, la primera muestra marca a 11,5us que equivale a 3.9mm, suponiendo que la velocidad del sonido es de 334 m/s. De igual manera, con el formato Q8,8 el primer registro constaría con un valor real de 3.9mm. Por consiguiente, se tiene una representación acertada entre el tiempo y distancia medido, y el valor real. Los valores consiguientes se van acumulando en un registro similar al del vector de satélite

En PICBASIC PRO, no es posible la escritura de números de punto fijo Q8,8; sin embargo, la presentación de números enteros si lo es. Por lo tanto, para expresar un valor real de 1.5 metros a nivel de PIC; se debe multiplicar por un entero de 256 que representan los 8 bits menos significativos del formato Q8,8. Por ejemplo: .75cm a nivel de PIC es 192 ya que este valores es igual a la multiplicación entre .75cm y 256. De esta manera, se puede presentar todos los números reales entre 0 y 123,99 metros.

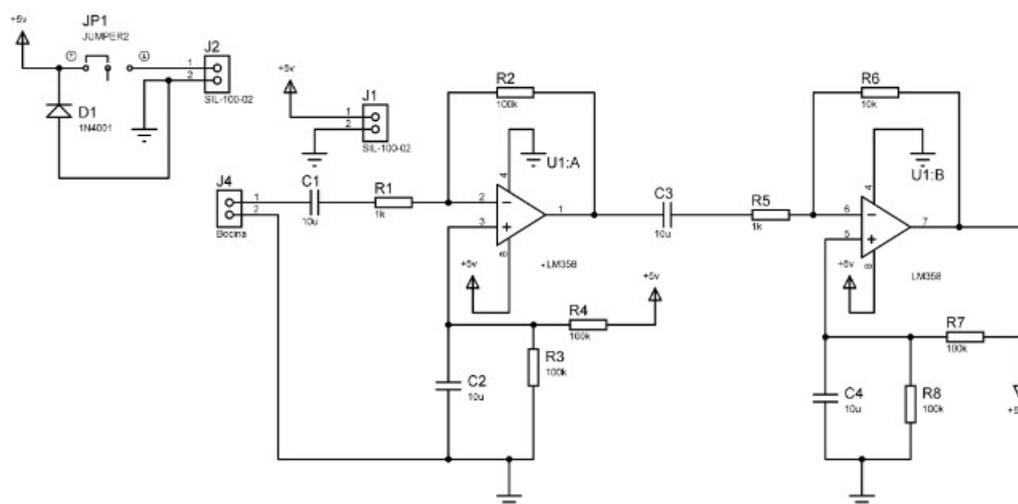
## **2) Módulo de Ultrasonido - Recepción**

El módulo receptor de ultrasonido consta de tres etapas fundamentales. La primera es la etapa de amplificación, la segunda etapa es una rectificación de medio

puente, y finalmente, una etapa de comparación entre un valor nominal de Treshold y la señal de la salida de rectificación.

### a. Amplificación

La señal que es enviada por los satélites se degrada en potencia por efectos de atenuación. Por este motivo, es necesario amplificar la señal de tal manera de que, el voltaje de la señal sonora sea suficiente para provocar la interrupción en el PIC. La amplificación se realiza con dos amplificadores operacionales conectados en cascada; los cuales ofrecen una ganancia de 20dB para el primer amplificador y 10dB para el segundo amplificador. En total la señal sufre un aumento significativo de 30dB desde su inicio hasta la etapa final de amplificación. Ver Figura 33.

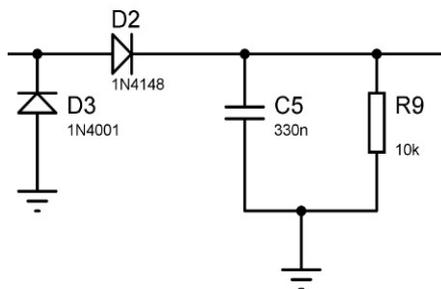


**Figura 33: Etapa de amplificación del receptor de ultrasonido. Consta de dos amplificadores operacionales en cascada con un total de 30dB. Fuente: Diseño final de tesis.**

### b. Rectificación

Después de la etapa de amplificación, la señal ingresa a la rectificación de medio puente que se muestra en la Figura 34. En el medio puente, la señal entrante polariza un diodo conectado a tierra que elimina la parte negativa de la señal, dando

como resultado solo los picos positivos.



**Figura 34: Circuito rectificador de media onda. Fuente: Diseño final de tesis.**

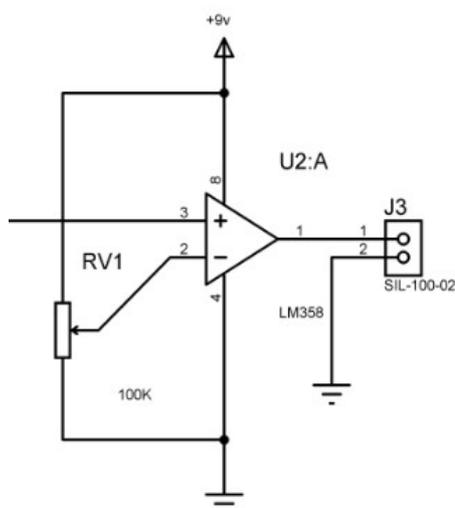
Estos picos positivos van a pasar directamente por el circuito rectificador que fue diseñado, aplicando la Ecuación 35, para mantener en alto el voltaje durante un ciclo completo de la señal.

$$\ln(0.05) RC = \frac{1}{f} \quad (\text{Ec.35})$$

Donde R es una resistencia (Ohms), C es un capacitor (Faradios) y f es la frecuencia de la señal.

### *c. Comparación*

Una vez que la señal es rectificada; inicia la etapa final de comparación. La rectificación es responsable de enviar una señal en corriente continua al comparador constituido por un amplificador operacional y un voltaje de Treshold ajustable mediante un potenciómetro de precisión. El comparador es calibrado de tal manera que, el alcance de la señal sonora sea máxima; y en consecuencia, se produzca un pulso que habilite la interrupción. Ver Figura 35.



**Figura 35: Comparador entre un señal de referencia y la salida del rectificador. Fuente: Diseño final de tesis.**

#### ***d. Algoritmo de trilateración***

La trilateración entra en funcionamiento cuando el vector de satélites y los registros de temporizador han alcanzado el valor óptimo de datos. Este valor óptimo es de tres ya que con estos valores de adquisición; la estimación de la posición queda resulta para un plano tridimensional. Sin embargo, el PIC está limitado en memoria y no se puede programar un sistema de ecuaciones para cada combinación de arribo de satélites. Por ejemplo, el método de resolución para el arribo de datos con identificadores  $(1,3,4,7)$  difiere totalmente de los identificadores  $(3,7,4,1)$ . Para solucionar este inconveniente, cada recepción de identificador de satélites debe comenzar en “1”. En caso, que no se cumpla esta condición, el receptor inicializa las variables hasta captar el identificador del primer satélite. En consecuencia, el orden de los registros captados por el receptor se mantiene fijo; provocando que las ecuaciones permanezcan estáticas; y por consiguiente, el mismo sistema de ecuaciones se ejecute como se muestra a continuación.

```

.....
TRIANGULO:
..... X: .....
X = ( (D[0]*/D[0]) - (D[1]*/D[1]) )
..... Y: .....
Y = ( (D[2]*/D[2]) - (D[3]*/D[3]) )
.....
IF X>32767 THEN
    X= -X
    SX = 45
ELSE
    SX = 43
ENDIF
X = X*/137

IF Y>32767 THEN
    Y = - Y
    SY = 45
ELSE
    SY = 43
ENDIF
Y = Y*/180
RETURN
.....

```

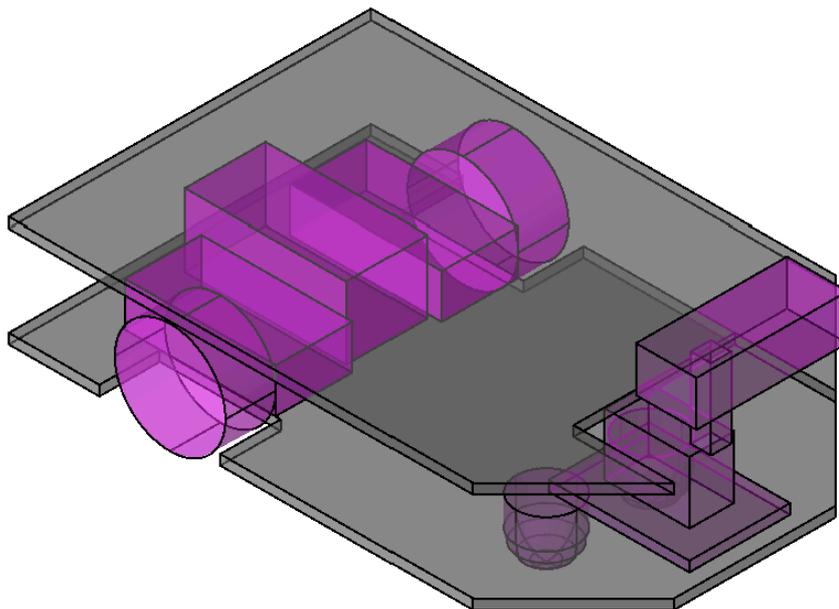
### **III. Diseño Mecánico y Electrónico del Robot Móvil:**

El robot móvil será de locomoción diferencial, se debe tener en cuenta ciertos aspectos como la capacidad de carga, por lo que tendrá que trasladar los circuitos de posicionamiento, los circuitos que proveen la navegación y el circuito driver de los motores, adicionalmente la fuente de voltaje para todo el sistema dentro del móvil. Para esto se diseñó un modelo en el software AutoCAD para planear el lugar de cada elemento. Se tomó en consideración la posición del sensor para evitación de obstáculos, la posición de los motores, la posición de la batería y el espacio para los circuitos antes mencionados. Así mismo la implementación del sensor para la parte de evitación de obstáculos se utilizará un actuador y un sensor de proximidad, para realizar un barrido. Adicionalmente la modificación de servomotores para utilizarlos como motores DC. Finalmente, el diseño electrónico utilizando el sistema embebido Arduino junto con un driver de motor, una placa de entradas y salida, la brújula magnética y un LCD para monitorear los datos.

#### **1) Diseño mecánico**

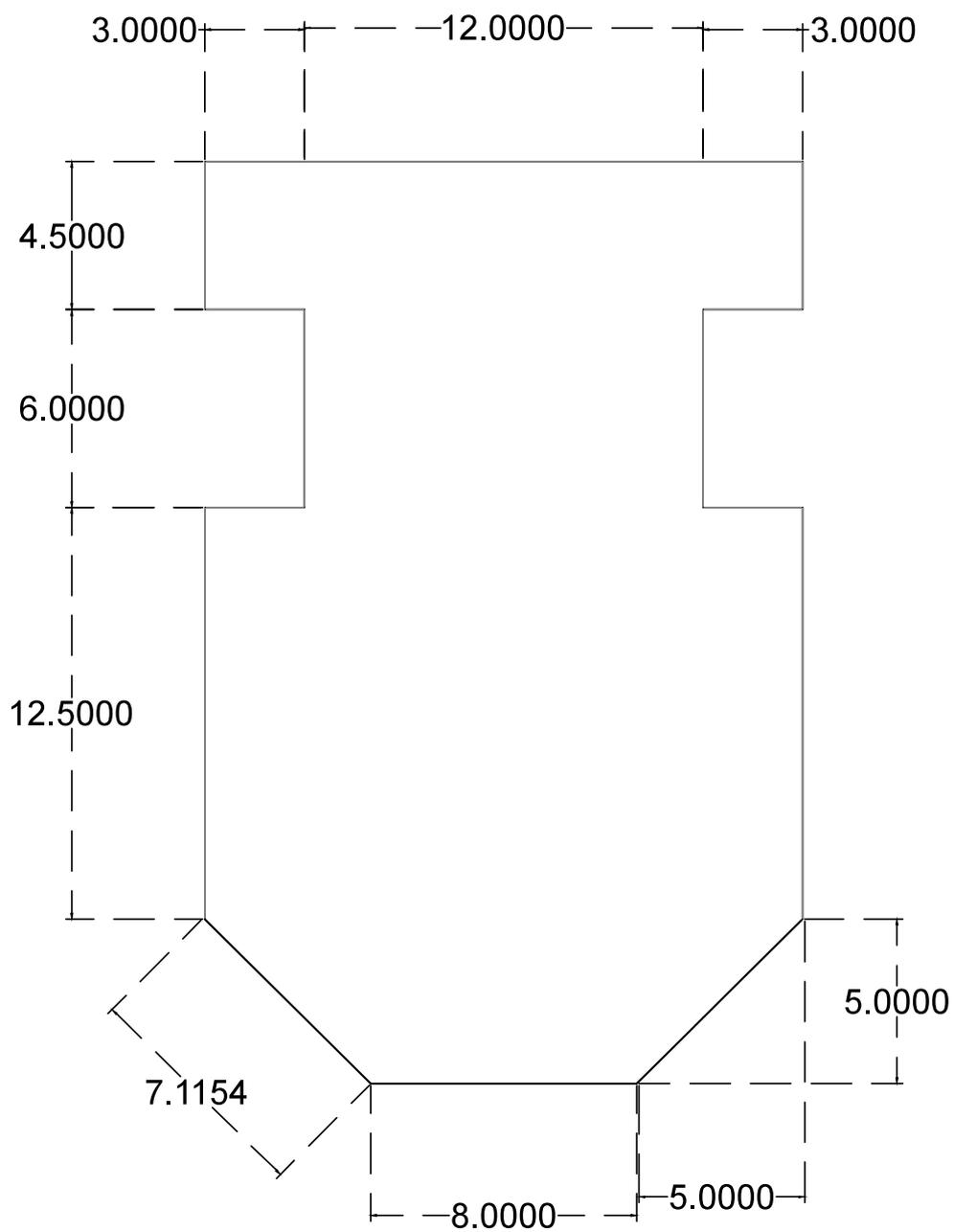
##### ***a. Planos del robot móvil:***

En la figura 36 se puede ver el diseño preliminar del robot, tomando en cuenta la posición de los motores, las llantas y la batería (fuente de voltaje), se utilizarán dos ruedas locas en la parte delantera y el sensor para evitación de obstáculos irá al frente del robot.



**Figura 36. Boceto del robot.**

Se utilizó aluminio para la base, el plano esta en la figura 37, en la cual será asegurada la base del sensor, los motores, las ruedas locas y el circuito de driver de motores, además alojara la batería. Para el segundo nivel se utilizará acrílico asegurado con pernos y tuercas a la base del robot, en ésta irán los circuitos de control y sensores.



*Figura 37. Plano de la base del robot.*

## ***b. Consideraciones adicionales:***

### **i. Modificación servomotores**

Por motivos de tamaño se decidió utilizar servomotores para el movimiento diferencial del motor, por lo que era inevitable modificar el servomotor para que funcione no solo en 180° sino en 360°, por lo que se utilizaron servomotores Hitech HS422 que tienen un torque de 3.3 kg.cm. y fueron adheridos a ruedas plásticas.

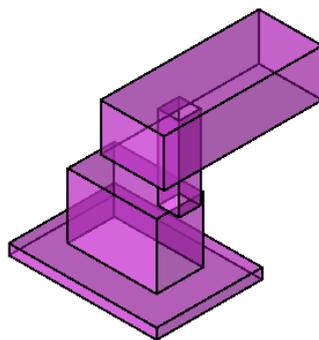
El procedimiento para modificar el servomotor es modificar un engrane, mostrado en al figura 38, dentro del servomotor y quitar el control interno del servomotor para poder conectar directamente al motor a través del driver del motor.



**Figura 38. Estructura interna del servomotor parte de engranes.**

### **ii. Sensor de evitación de obstáculos**

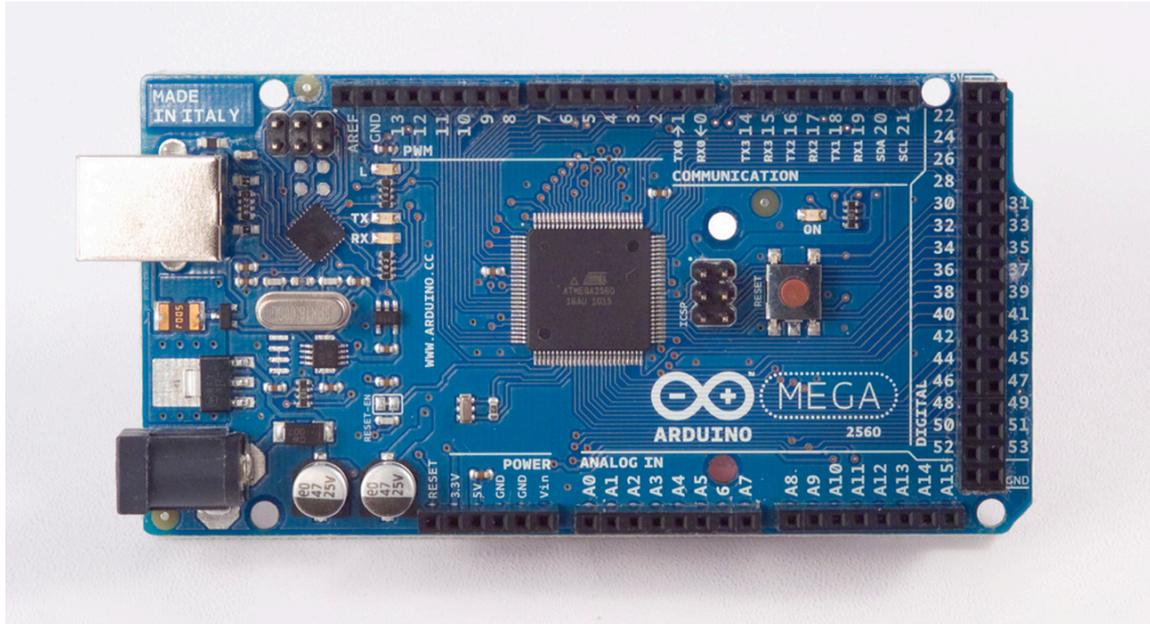
La importancia del sensor de proximidad para la evitación de obstáculos era un rango de 180° al frente del robot por lo que el sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A02YK, con un rango de 20cm a 150cm, será utilizado unido a un servomotor Hitech HS311. La estructura fue diseñada como muestra la figura 39.



**Figura 39. Estructura del sensor de evitación de obstáculos.**

## **2) Diseño Electrónico**

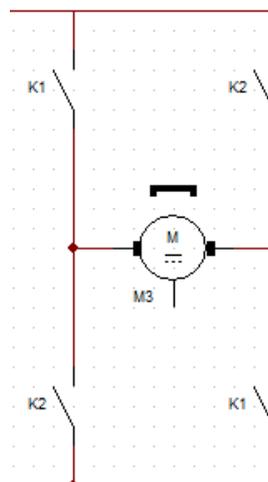
Para el robot móvil se utilizará un sistema embebido llamado Arduino, figura 40. El cual posee hardware abierto con un procesador AtmelAVR, el software consiste en un compilador de lenguaje de programación estándar y un programa de acceso a la memoria no volátil al empezar a correr el programa. Para este caso se utilizó un Arduino Mega 2560 el cual utiliza un procesador ATmega 2560 con un reloj de 16MHz el cual opera a 5V. Posee 54 entradas y salidas digitales, 14 de las cuales tienen salidas PWM, 16 entradas análogas. Tiene una memoria flash para el programa de 256KB, SRAM 8KB y 4KB de EEPROM. El sistema tendrá que energizar el sistema embebido, dos circuitos de la parte de posicionamiento, los motores DC, el servomotor y el sensor de infrarrojo, la brújula magnética y el LCD. Por esto se utiliza una batería de 12V de 1.3AH recargable.



**Figura 40. Arduino Mega 2560**

**a. Driver de los motores:**

Los motores DC (servomotores modificados) serán manejados con un puente h que recibirá la señal de modulación por ancho de pulsos (PWM) proveniente del Arduino y la amplificara. En la figura 41 está el puente h el cual tendrá cerrado o k1 o k2, dependiendo de la señal PWM.



**Figura 41. Puente H**

Para este caso se utilizó un L298, doble puente H completo, para manejar ambos motores, en la figura 42 está un puente h completo en el L298, el cual posee sus señales PWM y una señal de control digital de 5V (TTL).

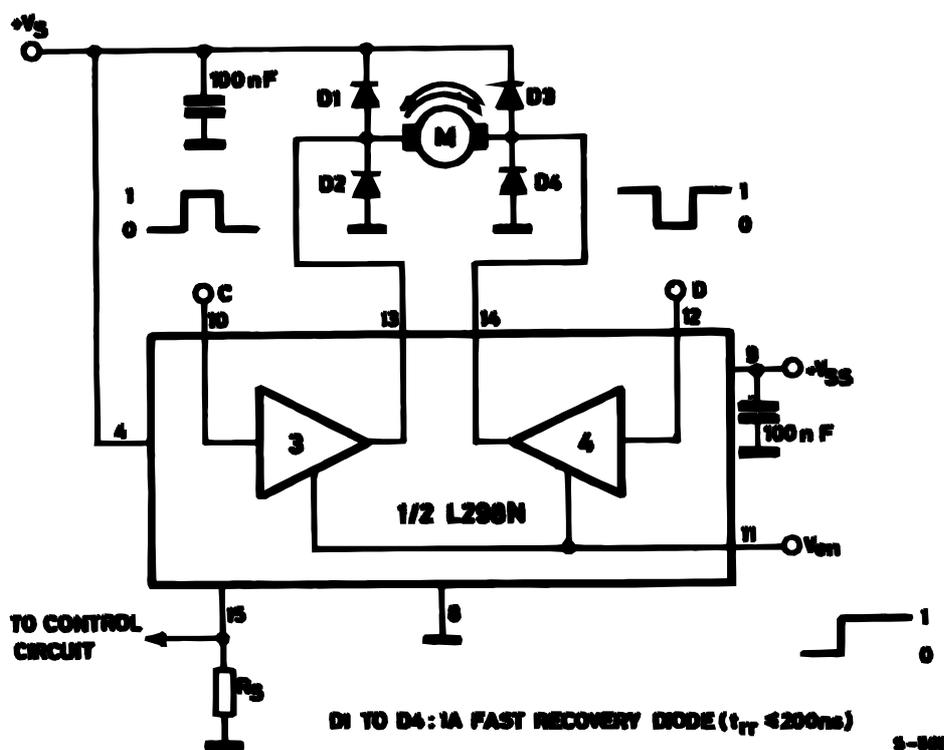
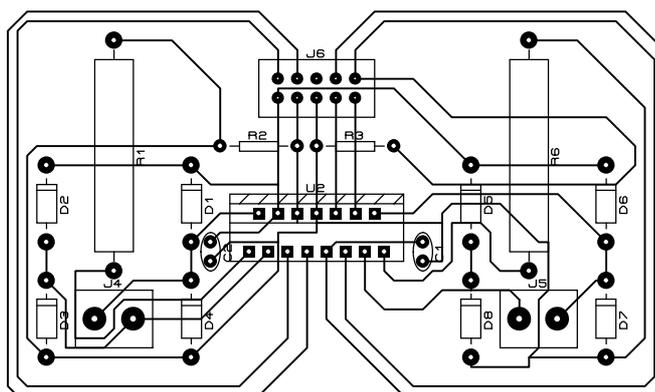


Figura 42. Mitad de L298

Se decidió realizar una simulación en el software Proteus, utilizando elementos de protección como diodos para que manejen la corriente inversa al cambiar de sentido de rotación de los motores. Ahora ya con la simulación se hizo un circuito impreso para incluirlo dentro del robot móvil. En la figura 43 está el circuito impreso y la posición de cada elemento discreto.

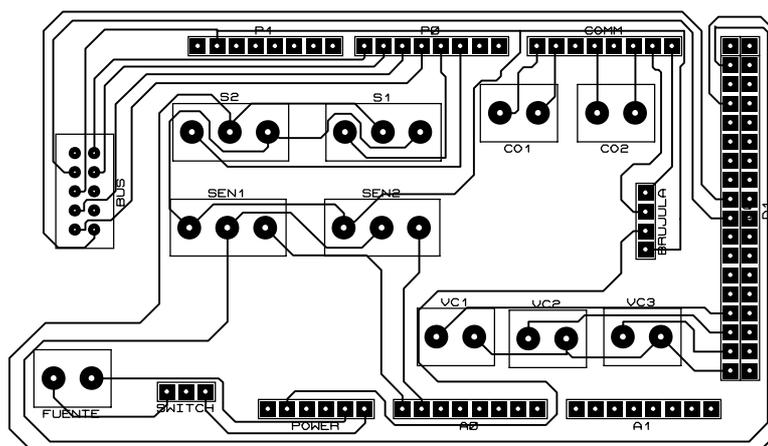


**Figura 43. Circuito impreso puente H**

Se puede ver que se utilizó un conector de cable plano (bus) para conectarlo con el arduino. Adicionalmente se pusieron resistencias de 5W para los pines de sensibilidad del puente H los que muestran cuánta corriente está consumiendo cada motor.

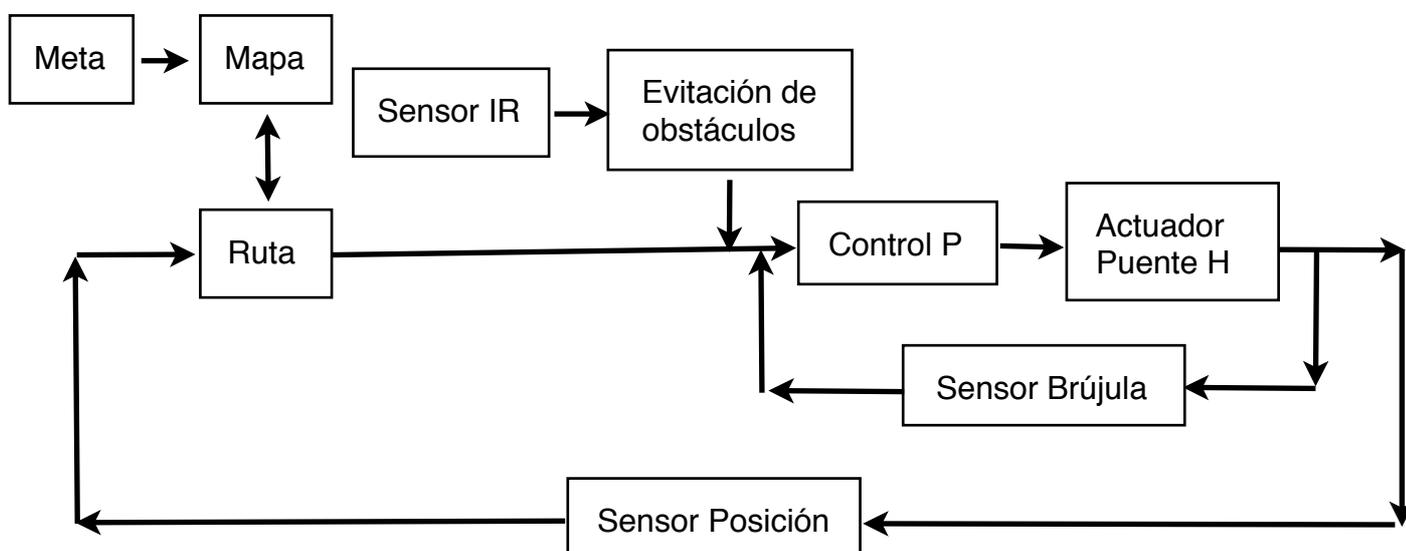
***b. Placa de entradas y salidas:***

El Arduino tiene mas de 80 pines de entradas y salidas, y para hacer la conexión con todos los elementos se diseñó un circuito impreso con borneras, sockets y conectores de cable plano, mostrado en la figura 44. De esta forma sería más simple conectar todo el sistema.



**Figura 44. Circuito impreso de entradas y salidas para el sistema embebido.**

#### IV. Diseño del Sistema de Navegación



*Figura 45. Máquina de Estados*

Para el diseño del sistema de navegación se realizó una máquina de estados que nos permitirá organizar el programa de mejor manera. Así mismo la integración de los sensores y actuadores, y los métodos de planeación de trayectorias y evitación de obstáculos. En la figura 45 se encuentra la máquina de estados. La planificación de trayectoria será hecha a través de definir una meta, ubicarla en el mapa, y crear un mapa utilizando el método de propagación de onda. Esta información será utilizada por el robot móvil para decidir hacia donde ir. Adicionalmente se encuentra el sistema de evitación de obstáculos, que será un modelo de decisión fuzzy de acuerdo a datos adquiridos por el barrido del sensor de proximidad. Estos dos datos de planeación y obstáculos proveen un ángulo que utilizará el control proporcional en lazo cerrado luego de comparar este valor con el ángulo entregado por la brújula magnética. Para activar el sistema, el robot espera que arribe una coordenada, realiza todo el proceso y espera la siguiente coordenada.

### 1) Diseño del sistema de planificación de trayectoria:

Se utiliza un planeamiento métrico, lo que significa una grilla cuadrada, para este caso cada subdivisión de la grilla en el mundo real tendrá un tamaño de 1cm por lado. Y será limitado por un círculo de 80cm de radio por razones de limitaciones del sensor de posición.

#### *a. Planeador utilizando Wavefront Propagation.*

El algoritmo puede ser descrito, como la búsqueda de los puntos alrededor de la meta, si existe un cero, es un espacio abierto; si existe un uno, existe una barrera. Cada que encuentre un cero se incrementará el valor actual más uno. Para este caso se describe el número dos como la meta, por lo que la onda irá de la meta a donde se encuentre el robot. El movimiento de la búsqueda puede ser hacia los lados, o adicionalmente a los puntos diagonales, para este caso cada punto también llamado nodo se moverá solo hacia los lados y no en forma diagonal. En la figura 46 se tiene un pequeño ejemplo de cómo se ve la onda, por lo que el robot lo que tendrá que buscar es el decremento mas grande por moverse hacia ese lado, de tal forma que siempre busque el camino mas corto, en este caso de los 4 nodos, cuál nodo le permite avanzar más hacia la meta; en este caso, el numero dos.

0	<b>1</b>	5	4	5
0	<b>1</b>	4	3	4
<b>9</b>	<b>1</b>	3	<b>2</b>	3
8	<b>1</b>	4	3	4
7	6	5	4	5

**Figura 46. La meta se encuentra en 2 y la posición actual del robot en 9.**

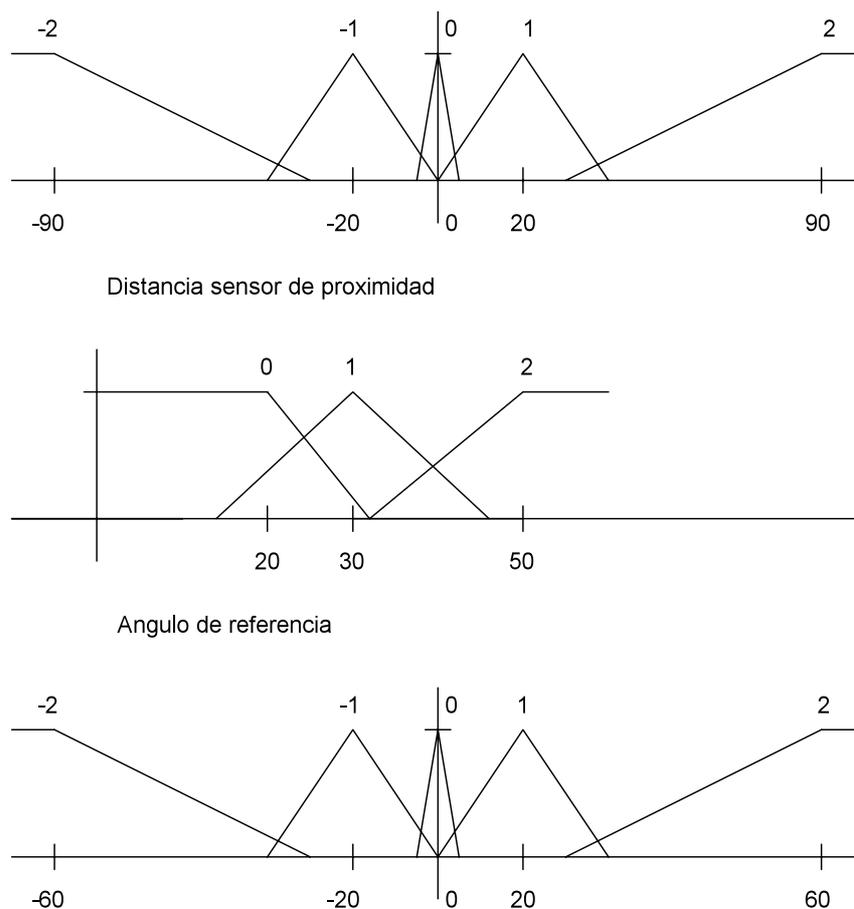
## 2) Diseño del sistema de evitación de obstáculos:

El sensor de proximidad al estar conectado a un servomotor, realiza un barrido a 180° frente al robot para buscar la presencia de algún obstáculo. Dado que el obstáculo puede estar en un rango alrededor del robot, y a distintas distancias, se realizó el diseño de un sistema Fuzzy de decisión para decidir qué nuevo ángulo irá al controlador proporcional, de tal forma que evite el obstáculo. La idea de la máquina de estados es que si existe un ángulo en el sistema de evitación de obstáculos, se descarte el ángulo de referencia encontrado por el planificador de trayectoria.

Para esto se utilizara de entrada el ángulo actual del servomotor tomando en cuenta un rango entre -90° a 90°, y la distancia del obstáculo por medio del sensor de proximidad. Para evitar falsos positivos se considera un objeto si al barrer el área existen muchos datos del sensor de proximidad especificando que se encuentra algo a determinada distancia tomando en cuenta una distancia mínima y máxima para que el sistema reaccione y utilice el modelo de decisión fuzzy.

### *a. Sistema Fuzzy*

El sistema Fuzzy tendrá de entradas el ángulo del servomotor y la distancia medida por el sensor de proximidad, se utilizará una condición de valores recogidos para realizar o no la valoración del sistema Fuzzy. La salida será el nuevo ángulo de referencia para el control proporcional. Para realizar el sistema se utilizan los conceptos propuestos en el marco teórico, la fuzzificación, el mecanismo de inferencia y la defuzzificación. Las funciones de membresía para las entradas y salida de la figura 47 definen el sistema fuzzy y cómo va a reaccionar dependiendo de las reglas base.



**Figura 47. Funciones de membresía dos entradas y una salida.**

**Cuadro 3. Base de reglas para el sistema fuzzy.**

		Distancia del sensor de proximidad		
		0	1	2
Angulo del Servomotor	-2	1	0	0
	-1	2	1	1
	0	-2	-2	-1
	1	-2	-1	-1
	2	-1	0	0

Las reglas permiten una amplia gama de decisiones, dependiendo de las condiciones de distancia y el ángulo del servomotor. Lo que dará como resultado variados valores de ángulos de referencia para que trabaje el robot de acuerdo a su entorno.

## Resultados y análisis

Los datos, que se obtuvieron experimentalmente del proyecto, van a determinar que tan acertado el sistema se comporta. Para el primer análisis de los resultados, se debe tomar en cuenta los registros que ingresan al PIC, los cuales representan las distancias medidas del tiempo de llegada de la onda sonora; y para el análisis final, se debe apreciar que tan exacta es la estimación de la posición utilizando puntos referenciales.

### I. Adquisición de puntos referenciales

La adquisición de los puntos, que se muestra en el Cuadro 4, Cuadro 5, Cuadro 6, Cuadro 7 y Cuadro 8, demuestra el grado de seguridad de los datos que son adquiridos ya que la variación de los mismos no difiere de una muestra. Estos datos confirman y demuestran la fiabilidad del sistema concernientes a la adquisición.

**Cuadro 4: Adquisición del punto (0,0) en un plano euclidiano.**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	558.8571428571	556.6666666667	553.6666666667	555.4285714286
<b>Promedio (Entero)</b>	559	557	554	555
<b>Desviación Standard</b>	1.1084094138	0.8563488386	0.9128709292	0.5070925528
<b>Desviación St. (Entero)</b>	1	1	1	1
<b>Máximo</b>	562	559	555	556
<b>Mínimo</b>	558	555	552	555
<b>Moda</b>	558	557	553	555

**Cuadro 5: Adquisición del punto (-20,-20) en un plano euclidiano.**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	549.4888888889	577.9555555556	552.1555555556	567.1777777778
<b>Promedio (Entero)</b>	549	578	552	567
<b>Desviación Standard</b>	0.5055250296	0.7964568	0.8778992372	0.4903101472
<b>Desviación St. (Entero)</b>	1	1	1	0
<b>Máximo</b>	550	579	554	568
<b>Mínimo</b>	549	577	550	566
<b>Moda</b>	549	578	552	567

**Cuadro 6: Adquisición del punto (+20,+20) en un plano euclidiano.**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	550.4736842105	574.7894736842	566.8947368421	552
<b>Promedio (Entero)</b>	550	575	567	552
<b>Desviación Standard</b>	0.7618200861	0.7766140903	0.8941090593	0.2324952775
<b>Desviación St. (Entero)</b>	1	1	1	0
<b>Máximo</b>	554	577	569	553
<b>Mínimo</b>	550	573	566	551
<b>Moda</b>	550	575	566	552

**Cuadro 7: Adquisición del punto (-20,+20) en un plano euclidiano.**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	578.8888888889	551.1111111111	570.4444444444	555.1111111111
<b>Promedio (Entero)</b>	579	551	570	555
<b>Desviación Standard</b>	1.4529663145	0.3333333333	1.2360330812	0.3333333333
<b>Desviación St. (Entero)</b>	1	0	1	0
<b>Máximo</b>	581	552	572	556
<b>Mínimo</b>	577	551	568	555
<b>Moda</b>	578	551	570	555

**Cuadro 8: Adquisición del punto (+20,-20) en un plano euclidiano.**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	577.619047619	551	554.9047619048	569.5714285714
<b>Promedio (Entero)</b>	578	551	555	570
<b>Desviación Standard</b>	0.4976133515	0.7071067812	0.8890872794	0.5070925528
<b>Desviación St. (Entero)</b>	0	1	1	1
<b>Máximo</b>	578	552	557	570
<b>Mínimo</b>	577	550	554	569
<b>Moda</b>	578	551	555	570

## II. Distancias medidas

Los datos que se obtiene en la etapa de adquisición representan distancias en un dominio real. Estas distancias sirven como radios de circunferencias que se utilizan para poder estimar la posición. Los datos que se muestran en las siguientes tablas, a diferencia de la variación de los datos anteriores, presentan un aumento con respecto a la varianza. Esto se debe a los errores de redondeo que se producen al agregar o disminuir una muestra. Sin embargo, el promedio de las distancias no se ve alterado en

su valor nominal.

**Cuadro 9: Distancias desde la posición (0,0).**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	2.1830357143	2.1744791667	2.1627604167	2.1696428571
<b>Desviación Standard</b>	0.0043297243	0.0033451127	0.0035659021	0.0019808303
<b>Moda</b>	2.1796875	2.17578125	2.16015625	2.16796875

**Cuadro 10: Distancias desde la posición (-20,-20).**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	2.1464409722	2.2576388889	2.1568576389	2.2155381944
<b>Desviación Standard</b>	0.0019747071	0.0031111594	0.0034292939	0.001915274
<b>Moda</b>	2.14453125	2.2578125	2.15625	2.21484375

**Cuadro 11: Distancias desde la posición (+20,+20).**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	2.2612847222	2.1527777778	2.2282986111	2.1684027778
<b>Desviación Standard</b>	0.0056756497	0.0013020833	0.0048282542	0.0013020833
<b>Moda</b>	2.2578125	2.15234375	2.2265625	2.16796875

**Cuadro 12: Distancias desde la posición (-20,+20).**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	2.1502878289	2.2452713816	2.2144325658	2.15625
<b>Desviación Standard</b>	0.0029758597	0.0030336488	0.0034926135	0.0009081847
<b>Moda</b>	2.1484375	2.24609375	2.2109375	2.15625

**Cuadro 13: Distancias desde la posición (+20,-20).**

	Oeste	Este	Sur	Norte
<b>Promedio</b>	2.2563244048	2.15234375	2.1675967262	2.2248883929
<b>Desviación Standard</b>	0.0019438022	0.0027621359	0.0034729972	0.0019808303
<b>Moda</b>	2.2578125	2.15234375	2.16796875	2.2265625

### III. Estimación de la posición

Con los datos que adquiere el PIC, se procede a la estimación de la posición final. Este proceso se realiza netamente mediante software y esta sujeto a errores de redondeos

provocados por la multiplicación y división que tienen las ecuaciones de trilateración. Los errores de redondeo pueden desplazar la estimación de su valor óptimo produciendo aumento en la varianza; y por ende, existe un aumento del porcentaje de error en la estimación. La estimación que se muestra en los siguientes cuadros reflejan el desempeño total; en lo que respecta a la determinación de la posición.

**Cuadro 14: Estimación final de la posición (0,0).**

	X	Y
<b>Prome dio</b>	0.0096923828	-0.0112190412
<b>Desviación Standard</b>	0.0060343718	0.0127504428

**Cuadro 15: Estimación final de la posición (-20,-20).**

	X	Y
<b>Prome dio</b>	-0.2194478943	-0.1830050793
<b>Desviación Standard</b>	0.0067722714	0.0123908714

**Cuadro 16: Estimación final de la posición (+20,+20).**

	X	Y
<b>Prome dio</b>	0.2017319831	0.2108812942
<b>Desviación Standard</b>	0.010046903	0.0173967965

**Cuadro 17: Estimación final de la posición (-20,+20).**

	X	Y
<b>Prome dio</b>	-0.1880461599	0.2040216668
<b>Desviación Standard</b>	0.0060481122	0.0124622751

**Cuadro 18: Estimación final de la posición (+20,-20).**

	X	Y
<b>Prome dio</b>	0.1927880581	-0.1792765476
<b>Desviación Standard</b>	0.0059722632	0.0154928564

Como se observa, los resultados de los cuadros 14-18 reflejan la habilidad del sistema para estimar la posición del robot en diferentes sectores de un plano cartesiano. Los resultados corroboran una buena aproximación en cada sector del plano, en donde la

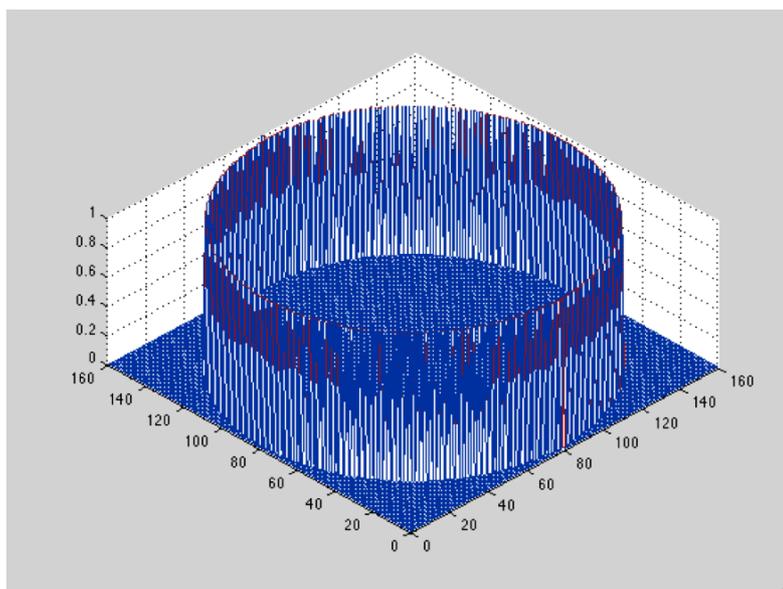
incertidumbre o error no sobrepasa los 3 cm. El origen del error está en la diferencia de rangos medidos por el receptor y en el acarreo de errores de redondeo producidos por las operaciones matemáticas realizadas por el microcontrolador. Sin embargo, la estimación tiene un buen grado de acertamiento ya que, en primer lugar, los signos están correctamente identificados según el cuadrante en donde se tomaron las muestras; segundo, el valor nominal de la estimación no se encuentra tan alejado de su valor real. La media de la posición, en cada cuadrante, se encuentra en un valor aproximado a la posición predeterminada; y el valor de la desviación estándar de las medidas no supera el un centímetro. Sin embargo, en ciertas ocasiones se producen valores que se encuentran fuera de la media en el proceso de adquisición. Esto ocasiona una estimación fuera de lo normal, lo cual conlleva al aumento del error. Las razones principales por la cual existen estas variaciones en las mediciones nace de la naturaleza propia de la onda ultrasónica. Los fenómenos que pueden presentarse desde el inicio de la propagación hasta el momento de llegar al receptor son innumerables. Sin embargo, los efectos de rebotes o pérdidas de arribo de la señal son los que afectan directamente a la medida tomada por el PIC ya que, dependen directamente del tiempo de llegada de la señal.

Para poder caracterizar el prototipo desarrollado, se formuló un escenario específico en el cual se tenga control sobre la posición. Por esta razón, los datos obtenidos y procesados de los cuadros anteriores se obtuvieron en los cuatros cuadrantes del plano cartesiano. Por otro lado, las muestras que se obtuvieron tomando en cuenta el entorno en el que el prototipo fue desarrollado, fueron adquiridas a una temperatura de 23 °C en un ambiente cerrado, es decir, en los interiores de una habitación que no está muy poblada por muebles y estructuras metálicas a su alrededor.

## IV. Sistema de Navegación

### 1) Planificador de trayectoria

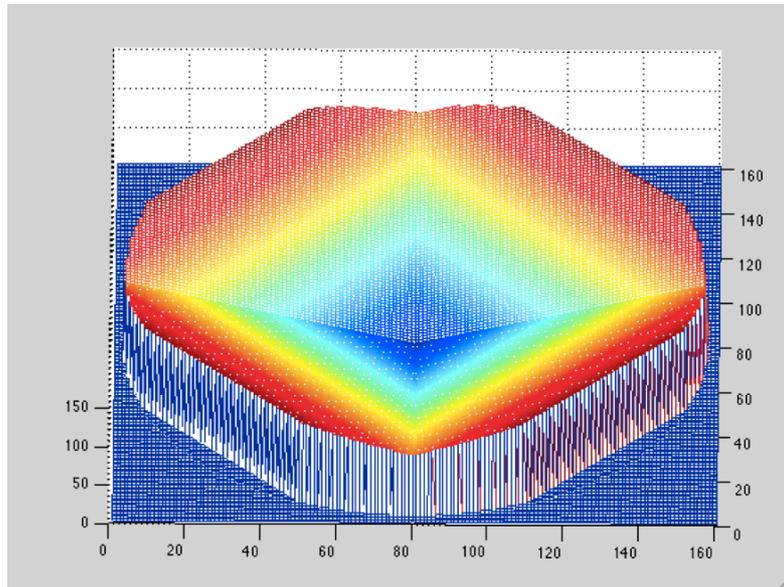
Esta parte necesitaba mucho procesamiento para realizar el Wavefront Propagation por lo que fue realizada con el software Matlab, y éstos datos de la grilla cuadrada fueron utilizados como el mapa del robot dentro del Arduino. Por ser una grilla de 160x160 datos se utilizó tipo de dato byte y la memoria flash del procesador para almacenar la información. Por limitaciones de la parte de posicionamiento se hizo una barrera de radio 80 centímetros utilizando el valor 1 que significa que existe un obstáculo, como muestra la figura 48.



**Figura 48. Grilla cuadrada con obstáculo circular de radio 80 centímetros.**

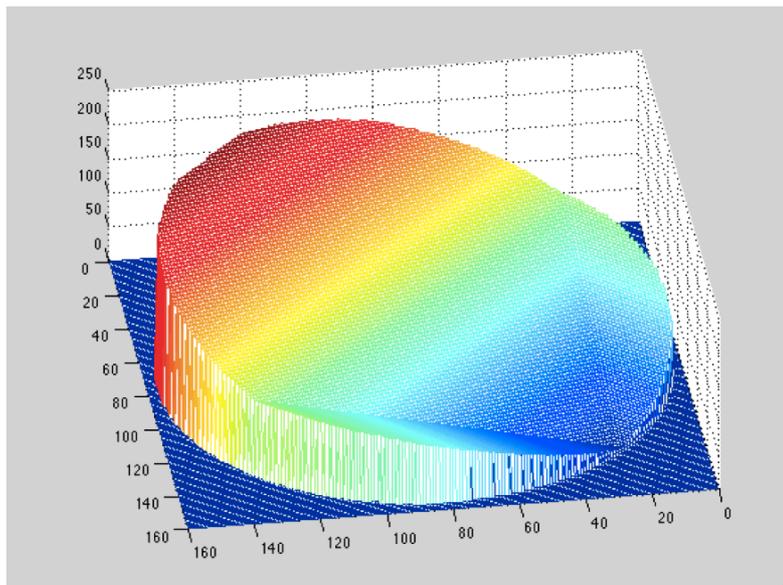
A partir de esta barrera se desarrollaron varios mapas para probar el algoritmo, desde la propagación y luego la búsqueda del mayor gradiente descendente para encontrar la meta. Para empezar, se utilizó el valor de la meta en  $x: 80$ ,  $y: 80$ , y el lado extremo del círculo para que haga la propagación, como puede ser vista en la figura 49, aquí se puede ver el valle que se forma, por lo que en cualquier posición que se ubique el robot, siempre

buscará el centro. Para este caso el robot buscara ángulos de referencia en  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ , buscando el máximo gradiente para descender.



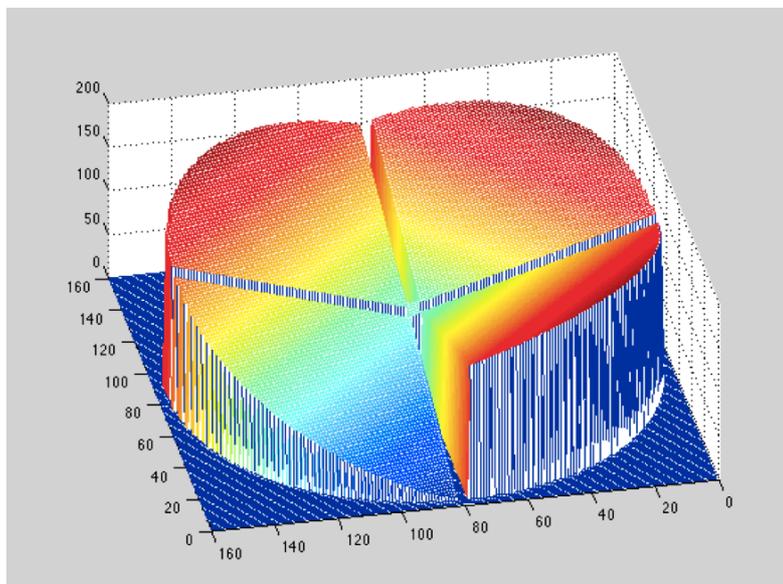
**Figura 49. Grilla cuadrada con meta en x: 80cm y: 80cm con Wavefront Propagation.**

A continuación, se utilizó un punto arbitrario en un lado del círculo para mostrar la eficacia del planeador, como se puede ver en la figura 50, el gradiente es notable por lo que el robot siempre tratará de bajar, dicho en otras palabras, le atrae el mayor descenso.



**Figura 50. Grilla cuadrada con un punto arbitrario a un lado del círculo que limita el mapa.**

Para finalizar, se realizó una grilla cuadrada con más obstáculos. En este caso el único paso es por  $x:80 \pm 2$ ,  $y: 80 \pm 2$  y la meta está muy cerca de uno de los obstáculos, como se ve en la figura 51.



**Figura 51. Grilla cuadrada con obstáculos con la posibilidad de llegar a la meta cruzando por el centro.**

Para ésta parte, el Arduino, ya con la posición, busca en la grilla hacia los 4 lados del nodo donde hay el mayor gradiente descendente, por medio del conteo de posiciones donde exista descenso y utilizando el mayor de éstos, para este caso se lo dejo en 30 repeticiones a cada lado para encontrar cuál lado es el mas óptimo.

## 2) Evitación de obstáculos

Esta parte fue planteada en Matlab y simulada utilizando las funciones de membresía y la base de reglas, los resultados se pueden ver en el cuadro 19 para tres distancias medidas por el sensor de infrarrojo, 25cm, 35cm y 45cm y para cinco posiciones del servomotor  $-90^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $90^\circ$ . El cuadro muestra las diferentes reacciones del sistema Fuzzy para diferentes condiciones, desde encontrar un objeto a  $-90^\circ$  a 25cm o encontrar un objeto a  $0^\circ$ , lo que significa al frente del robot, a 25cm que en éste caso dará un ángulo de referencia para el control del robot mayor.

**Cuadro 19. Simulación del Sistema Fuzzy en Matlab.**

		Distancia del Obstáculo [cm]		
		25	35	45
Angulo del Servomotor [grados]	-90	13	0	0
	-20	44	20	20
	0	-60	-53	-27
	20	-44	-20	-20
	90	-13	0	0

A continuación, se implementó el mismo sistema en el robot móvil utilizando el Arduino como plataforma de desarrollo. Se tomó en cuenta filtrado de datos del sensor de infrarrojo y precisión del servomotor para caracterizar el sistema Fuzzy. En el cuadro 20 se pueden ver los datos encontrados del sistema Fuzzy utilizando la comunicación serial de la

computadora con el Arduino. Estos datos fueron tomados al utilizar solo el sensor de infrarrojo y definir un ángulo estático para el servomotor. Los datos tuvieron un cambio en los resultados comparado con la simulación por el planteo del sistema Fuzzy, que varió en ciertos valores para que sea más rápido el procesamiento de resultados, y el redondeo de las operaciones matemáticas dentro del Arduino.

**Cuadro 20. Sistema Fuzzy del Robot**

		<b>Distancia del Obstáculo [cm]</b>		
		<b>25</b>	<b>35</b>	<b>45</b>
<b>Angulo del Servomotor [grados]</b>	<b>-90</b>	13	0	0
	<b>-20</b>	44	20	20
	<b>0</b>	-60	-44	-44
	<b>20</b>	-44	-20	-20
	<b>90</b>	-13	0	0

Para terminar con la caracterización, se utilizó el robot en movimiento, al igual que el servomotor para encontrar la eficacia del sistema. En el cuadro 21, se puede ver que aunque presenta errores el sistema funciona de acuerdo a lo esperado con sus limitaciones de hardware.

**Cuadro 21. Sistema Fuzzy del Robot, posición del objeto a 0° del robot y a 90°**

	Distancia del Obstáculo			
	0°		90°	
	25cm	45cm	25cm	45cm
<b>Promedio</b>	-53.8861	-39.8987	-11.1139	-4.3671
<b>Promedio (entero)</b>	-54	-40	-11	-4
<b>Desviación Standard</b>	13.2394	10.7936	9.5487	10.3986
<b>Desviación Standard (entero)</b>	13	11	10	10
<b>Máximo</b>	-60	-44	-44	-44
<b>Mínimo</b>	0	0	0	0
<b>Moda</b>	-60	-44	-13	0

### 3) Control Automático

Una vez obtenida una coordenada de posición, el robot apagará los receptores del sistema de posicionamiento, y por medio del procesador del Arduino empezara por encontrar el mayor gradiente descendente en el mapa guardado en su memoria flash, y obtendrá un ángulo de referencia. A continuación buscará obstáculos por medio del sensor de infrarrojo y el servomotor, y utilizará el sistema Fuzzy para que, en caso de encontrar un obstáculo, éste entregue un nuevo ángulo de referencia. Sea que se utilice el ángulo de referencia del planeador o el ángulo del sistema Fuzzy, se utilizó un control proporcional que compara el ángulo actual del robot, dato obtenido por la brújula magnética, y el ángulo de referencia y minimiza la diferencia entre éstos ángulos por medio del movimiento

diferencial del robot. Una vez minimizado la diferencia a casi cero, el robot empieza a moverse hacia adelante. Todo esto se realiza por un intervalo de tiempo para que actúe el control proporcional. Posteriormente, el robot prende los receptores del sistema de posicionamiento y esperará otra vez su posición para empezar el ciclo. Los datos del sensor de infrarrojo fueron linealizados y la brújula calibrada para obtener una mejor respuesta. Para el caso del control proporcional se permitió  $\pm 5$  grados de error, o en otro caso  $\pm 10^\circ$  de error, para evitar oscilaciones del movimiento diferencial. El algoritmo, al ser planteado con varias variables que permiten refinarlo, resultó muy útil para probar cada parte del proyecto. Por ejemplo el error en estado estable del control proporcional, la cantidad de iteraciones en búsqueda del mayor gradiente, el tiempo de espera para que actúe el control proporcional y finalmente la amplitud de la meta que es el lugar en la grilla donde existe el numero dos.

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **I. Conclusiones**

El sistema de localización, alimentado por ondas sonoras se encuentra en un estado de funcionamiento satisfactorio ya que todas sus partes se comportan de acuerdo a lo previsto en sus etapas de diseño. Por ejemplo, la comunicación entre los dispositivos de radiofrecuencia cumple con su función de identificar los satélites; así como de sincronizar el módulo receptor para la toma del tiempo de llegada de la onda sonora. La emisión de ondas de ultrasonido que emiten los transmisores funcionan a una frecuencia estable y ajustable producida por la combinación entre el temporizador N555 y un potenciómetro de precisión. El proceso de adquisición funciona de la manera prevista, ya que obtiene medidas coherentes de las distancias entre los satélites y el robot. Finalmente, el proceso de triangulación confirma el buen funcionamiento del sistema de localización. Los resultados de las posiciones tienen valores muy cercanos a los valores de posición teóricos, esto indica que la estimación es válida aunque existan pequeñas variaciones con respecto a su valor nominal ya que, estas pequeñas variaciones son producidas por efectos de la propagación de ondas sonoras y se amplifican al momento de realizar operaciones matemáticas por acarreo de error de redondeo. No obstante, el sistema de localización funciona de acuerdo a las expectativas establecidas al inicio de este proyecto final.

Gracias a la conectividad del Arduino a la computadora por comunicación serial, se probó el algoritmo al simular diferentes condiciones como la localización de robot, o a su vez detener el movimiento para revisar el planeador de trayectoria y el sistema evitación de obstáculos. Adicionalmente, al observar por la pantalla LCD a tiempo real, la posición, el ángulo Fuzzy y el ángulo de referencia, se vio que el

sistema funcionaba de acuerdo a lo esperado. Para medir y documentar cada parte del proyecto se utilizó una grilla de madera, el trazado se realizó con tiza para modificarla y marcar puntos importantes, y se encontró problemas en la recepción de la posición lo que detenía el sistema y era necesario reiniciar el robot móvil para que obtenga los datos. Los motores del movimiento diferencial del robot reaccionan de acorde al control proporcional, sin embargo, cuando la brújula proporcionaba datos erróneos, empezaba a oscilar el movimiento del robot. Se encontró errores en la obtención de datos del sistema de evitación de obstáculos debido a mediciones inexactas del sensor de proximidad.

## **II. Recomendaciones**

- Obtener transductores de ultrasonido cuyos lóbulos de radiación sean sectoriales y no directivos.
- Obtener dispositivos de radiofrecuencia que sean mas fiables en su comunicación, en especial si utilizan bandas no licenciadas.
- Estructurar de mejor manera el soporte de los transmisores de ultrasonido, ya sea mediante el uso de ganchos o cintas especiales.
- Para reducir los errores de redondeo, se debe utilizar un dispositivo que maneje estructuras de punto fijo o flotante con 32 bits de procesamiento.
- Obtener mejores sensores de infrarrojo capaces de filtrar basura del medio ambiente.
- Utilizar filtros para la obtención de datos de la brújula, por medio de un filtro de Kalman, utilizando magnetómetros y acelerómetros.

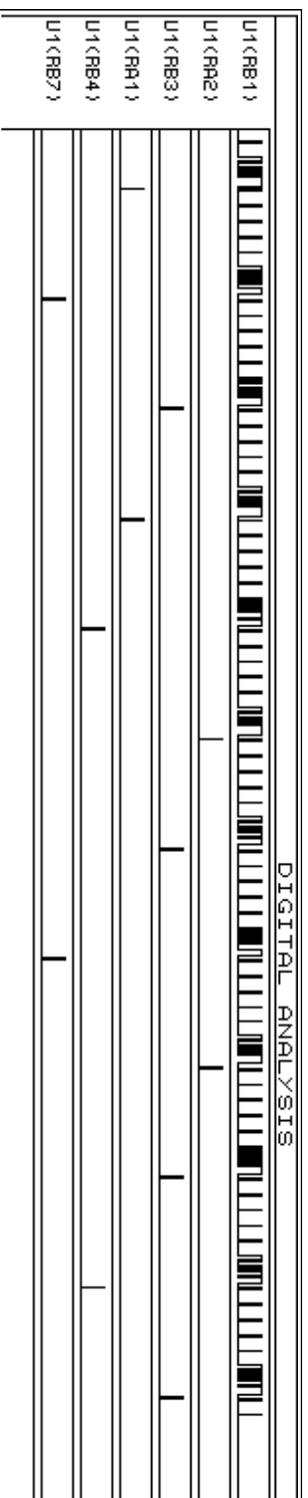
- Refinar algoritmo del planeador de rutas, del sistema de evitación de obstáculos y del control proporcional.
- El robot móvil puede tener una menor dimensión para producir un prototipo más eficiente.
- Buscar otro método de producir el mapa que pueda ser procesado por el mismo robot móvil.

## **Referencias**

- [1] Bao, James y Tsui, Yen. “Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach”. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Pp. 73-85 (2000).  
Electrónico.
- [2] Bao, James y Tsui, Yen. “Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach”. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Pp. 8-10. (2000).  
Electrónico.
- [3] Bao, James y Tsui, Yen. “Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach”. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Pp. 11-14 (2000).  
Electrónico.
- [4] Eduardo Moreno Hernández. “Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de ultrasonido”.Centro de Ultrasonica. Pp. 2-3.(2000). Extraído de  
<[www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc](http://www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc)>
- [5] Eduardo Moreno Hernández. “Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de ultrasonido”.Centro de Ultrasonica. Pp. 11-12.(2000). Extraído de  
<[www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc](http://www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc)>
- [6] Eduardo Moreno Hernández. “Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de ultrasonido”.Centro de Ultrasonica. Pp. 14-16.(2000). Extraído de  
<[www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc](http://www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc)>
- [7] Sklar, Bernard. “Digital Communications: Fundamentals and Applications”. 2da Edición. Estados Unidos: Prentice Hall. Pp. 175-176 (2003). Impreso.
- [8] Sklar, Bernard. “Digital Communications: Fundamentals and Applications”. 2da Edición. Estados Unidos: Prentice Hall. Pp 175 179. (2003). Impreso.

- [9] Huerta, Rodrigo. “Representación de Números En Punto Fijo y Flotante: Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales”. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, Pp. 6(2003). Electrónico.
- [10] “Manual PICBASIC PRO”.microEngineering, Inc Labs. Pp.78 -87. (2000)
- [11] Priyantha, Nissanka, Anit, Chakraborty y Hari Balakrishnan. “The Cricket Location-Support System”. MIT Papers. Pp. (2000). Extraído de < >
- [12] “Temporizador N555”. Datasheet. Electrónico.
- [13] “PIC16F84a”. MICROCHIP. Datasheet. Electrónico.
- [14] Aníbal Ollero Baturone. “Modelos cinemáticos de robots móviles”. Robotica. Manipuladores y robot móviles. Primera Edición. Pp. 97-105. (2007)
- [15] Aníbal Ollero Baturone. “Compás magnético”. Robotica. Manipuladores y robot móviles. Primera Edición. Pp. 186-188. (2007)
- [16] Aníbal Ollero Baturone. “Sensores de Presencia y Proximidad”. Robotica. Manipuladores y robot móviles. Primera Edición. Pp. 178-180. (2007)
- [17] Aníbal Ollero Baturone. “Detección, evitación y planificación”. Robotica. Manipuladores y robot móviles. Primera Edición. Pp. 370-375. (2007)
- [18] Robin Murphy. “Metric Path Planning”. Introduction to AI Robotics. Segunda Edición. Pp. 351-372. (2002)
- [19] Kevin Passino. “General Fuzzy Systems”. Fuzzy Control. Primera Edición. Pp. 52-69. (1998)
- [20] “HMC6352”. Datasheet. Electrónico.
- [21] “Transistor Darlington”. Electrónica Unicrom. Electrónico. Extraído de < [http://www.unicrom.com/tut\\_darlington.asp](http://www.unicrom.com/tut_darlington.asp) >

## ANEXO A



**Figura 25: Activación de satélites o transmisor de ultrasonido. Después de cada secuencia de sincronización, existe un pulso que activa los satélites que se encuentran distribuidos en diferentes pines del PIC16F84a. Fuente: Simulación Proteus de tesis**