



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD AZCAPOTZALCO  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES AL  
ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL**

**TESINA**

**PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:  
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

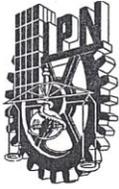
**Francisco Samuel Acosta Briones**

**DIRECTORA DE TESINA:**

**Dra. Maricela Guadalupe Figueroa García.**



**MÉXICO D.F., JUNIO 2011**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México D.F. siendo las 16 horas del día 30 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la SEPI unidad Azcapotzalco para examinar la tesis titulada:  
**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES AL ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL**

Presentada por el alumno:

<b>Acosta</b>	<b>Briones</b>	<b>Francisco Samuel</b>						
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)						
		B	1	0	2	0	2	5

Con registro:

aspirante de:

Especialidad en Ingeniería Mecánica con opción en Automatización de Procesos Industriales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISIÓN REVISORA**

Director(a) de tesis

DRA. MARICELA GUADALUPE FIGUEROA GARCÍA

DR. JOSÉ DE JESÚS RUBIO ÁVILA

DR. JAIME PACHECO MARTÍNEZ

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**

DR. JAIME PACHECO MARTÍNEZ



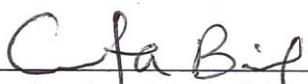


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México D.F. el día 4 del mes de Junio del año 2011, el (la) que suscribe Francisco Samuel Acosta Briones alumno (a) del Programa de Especialidad en Ingeniería Mecánica con número de registro B102025, adscrito a la SEPI Azcapotzalco manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesina bajo la dirección de la Dra. Maricela Guadalupe Figueroa García y cede los derechos del trabajo intitulado “Análisis e implementación de sensores al robot móvil tipo diferencial” al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección fransam\_acostab@hotmail.com y mfigueroag@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Francisco Samuel Acosta Briones

## ***AGRADECIMIENTOS.***

Quiero expresar mi más grande agradecimiento

Al Instituto Politécnico Nacional por darme la oportunidad de continuar con mi formación profesional en esta gran institución académica.

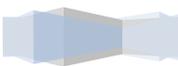
Al CONACYT por haberme favorecido durante mis estudios e investigaciones en la realización de este proyecto con una beca.

A mi directora de Tesina la Dra. Maricela Guadalupe Figueroa García por brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y dedicación para el desarrollo y término de este trabajo de investigación.

A los profesores que me impartieron clases por sus valiosas sugerencias y acertados aportes para que este trabajo saliera adelante de la mejor manera posible.

A mi familia por acompañarme con su cariño, comprensión y por enseñarme a enfrentar los obstáculos con alegría.

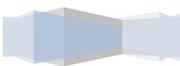
*Francisco Samuel Acosta Briones*



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>PROTOCOLO</b> .....	<b>7</b>
<b>Título</b> .....	<b>8</b>
<b>Antecedente</b> .....	<b>8</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>8</b>
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
<b>Justificación</b> .....	<b>8</b>
<b>Capitulado</b> .....	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 Introducción</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Descripción de un sensor</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3 Sensores internos y externos en robótica móvil</b> .....	<b>11</b>
1.3.1 Sensores internos.....	11
1.3.2 Sensores Externos.....	11
<b>1.4 Sensores infrarrojos</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5 Codificadores ópticos incrementales</b> .....	<b>15</b>
<b>1.6 Otros sensores empleados en robótica móvil</b> .....	<b>19</b>
1.6.1 Sensores de ultrasonidos.....	19
1.6.2 Interruptor mecánico (Detectores por contacto).....	19
1.6.3 Interruptores Gravitatorios.....	20
1.6.4 Codificadores ópticos absolutos.....	21
1.6.5 Micrófonos.....	21
1.6.6 Cámaras de visión.....	22
<b>1.7 Sensores analógicos y Sensores digitales</b> .....	<b>22</b>
<b>1.8 Conversión A/D y D/A</b> .....	<b>24</b>
<b>1.9 Dispositivos de Entrada/Salida</b> .....	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Introducción</b> .....	<b>28</b>

<b>2.2 Sistema motriz diferencial.....</b>	<b>28</b>
2.2.1 Parámetros y variables relacionadas con el movimiento del robot móvil .....	29
2.2.2 Posición del robot en el espacio .....	30
<b>2.3 Estructura mecánica. ....</b>	<b>31</b>
<b>2.4 Actuadores. ....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Ruedas .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6 Batería. ....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Introducción .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Características de los Sensores de infrarrojos del robot móvil. ....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Características de los codificadores ópticos incrementales del robot móvil.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Implementación de los sensores infrarrojos al robot móvil. ....</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Implementación de los Codificadores ópticos incrementales al robot móvil.....</b>	<b>46</b>
<b>Pruebas.....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusiones, Experiencias y Trabajos futuros.....</b>	<b>51</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>52</b>
<b>Apéndice A / Circuitos electrónicos. Especificaciones y planos del robot móvil diferencial. .</b>	<b>53</b>
<b>Circuito electrónico de los sensores infrarrojos.....</b>	<b>54</b>
<b>Circuito electrónico de los codificadores ópticos incrementales. ....</b>	<b>55</b>
<b>Configuración del circuito electrónico de todas las etapas.....</b>	<b>56</b>
<b>Hoja de Especificaciones de los motores.....</b>	<b>57</b>
<b>Hoja de Especificaciones de los codificadores ópticos. ....</b>	<b>58</b>
<b>Hoja de Especificaciones de los sensores infrarrojos. ....</b>	<b>59</b>
<b>Planos de diseño y construcción del Móvil tipo diferencial.....</b>	<b>60</b>



## RESUMEN

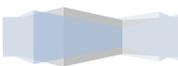
El presente trabajo consiste en el análisis de los sensores infrarrojos por reflexión a objeto y los codificadores ópticos incrementales encargados de proporcionar la información necesaria para ser utilizada en el sistema de control de un robot móvil tipo diferencial, ya que de acuerdo a sus características de funcionamiento permita su posterior implementación.

Para ello, se explican temas necesarios que van desde la descripción de sensor, la clasificación más utilizada de los sensores en las aplicaciones de robótica móvil, el estudio de los sensores infrarrojos, el estudio de los codificadores ópticos incrementales, una breve descripción de otros sensores utilizados en aplicaciones de robótica móvil, la descripción de los sensores analógicos y digitales, así como la conversión analógica/digital y digital/analógica, todo ello integra la información y la descripción matemática necesaria para el Marco teórico.

Posteriormente en el capítulo dos se estudiaron las características del robot móvil tipo diferencial empezando a separar sus partes componentes para analizarlos de forma particular desde los parámetros del sistema motriz, el diseño geométrico de su estructura mecánica con los planos de cada una de sus partes, los actuadores encargados de proporcionar el movimiento al móvil, el tipo como la disposición de sus ruedas y por último las características de la batería, todo ello en base al estado actual del móvil.

Con lo anterior se conocen las características de funcionamiento de sus elementos, permitiendo la adquisición de los sensores encargados de proporcionar la información del estado interno y del entorno próximo al robot para que pueda desplazarse de forma autónoma una distancia equidistante a las paredes en el interior de una habitación y a su vez le permita la detección y evasión de obstáculos de su entorno, lo cual se muestra en el capítulo tres en la implementación de los sensores al robot móvil. Con el fin de realizar la tarea antes mencionada se implementaron Codificadores ópticos incrementales y Sensores infrarrojos por reflexión a objeto, los cuales se encargarán respectivamente de proporcionar información para el control de la posición de sus ejes de giro y le permita desplazarse con trayectorias estables durante su recorrido, así como también de proporcionar información de la distancia con respecto a las paredes y la proximidad a objetos dentro de una habitación para evitar colisionar contra ellos. Todo ello implementado a la estructura actual del móvil, mostrando la ubicación de los sensores dentro del sistema del robot.

Finalmente se realizaron las pruebas convenientes a los sensores como al resto de la instalación compuesta por: circuitería, estructura mecánica y en general al robot móvil tipo diferencial, con la finalidad de que este cumpla con el objetivo planteado.



# ABSTRACT

This paper presents the analysis for infrared sensors by reflection to an object and incremental optical encoders responsible for providing the information necessary for the control system in a differential type mobile robot, since according to their characteristics operation allows its subsequent implementation.

Therefore, are explained necessary items as the description of an sensor, the more classification of sensors used in mobile robot applications, a study of the infrared sensors and the incremental optical encoders, a brief other description of sensors used in the mobile robotics applications, description of the analog and digital sensors, also the analog-digital conversion and digital-analog conversion. This includes all the necessary information for the theoretical framework.

Later in chapter two we studied the characteristics for the mobile robot, beginning to separate its components parts for analyze them from in particular form, as the system parameters robotic, the geometric design of mechanical structure with the planes of each of its parts, the actuators are responsible for providing the movement to the robot, the type and arrangement of its wheels and finally the characteristics of the battery, all in base the current state of the mobile robot.

With the above known the operating characteristics of each of its elements, allowing the acquisition of the sensors responsible for providing the Info internal and the environment next a mobile robot, for to navigate autonomously a equidistant distance the walls in a room and in turn allows detection and evasion of obstacles. This is shown in chapter three "The implementation of mobile robot sensors". For the previous task were implemented incremental optical encoders and infrared sensors, which are respectively responsible for providing information to control the position of its axis of rotation and for stable trajectories along the way, as well as to provide information on the distance from the walls and proximity to objects within a room to avoid colliding with them. All this implemented to the current structure of the mobile, showing the location of the sensors inside the robot system.

Finally, appropriate tests were conducted to the sensors and the rest of the system comprising: circuitry, mechanical structure and general to the differential type mobile robot, in order that it meets the objective.



# PROTOCOLO

## **Título.**

Análisis e implementación de sensores al robot móvil tipo diferencial

## **Antecedente.**

Continuación del proyecto que consiste en el diseño y construcción de la base de un robot móvil tipo diferencial.

## **Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Analizar e implementar los sensores que permitan al robot móvil tipo diferencial desplazarse dentro de una habitación de forma autónoma y efectiva una distancia equidistante a las paredes. Se describirán los sensores utilizados y su ubicación en la plataforma móvil mostrando los componentes físicos.

### **Objetivos específicos.**

- Estudio de los sensores más utilizados en la robótica móvil.
- Estudio de sensores infrarrojos
- Estudio de los codificadores de posición.
- Diseño del sistema sensorial del robot móvil en construcción.
- Implementación de los sensores.

## **Justificación.**

El presente proyecto se justifica debido al análisis e implementación de los sensores para un robot móvil tipo diferencial, con la finalidad principalmente de que estos aporten información necesaria tanto del estado interno del robot como del estado del entorno próximo al robot, para que pueda desplazarse de forma autónoma una distancia equidistante a las paredes en el interior de una habitación y a su vez le permita la evasión y detección de obstáculos en su entorno.

## **Capitulado.**

### **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.**

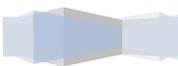
El capítulo muestra toda la información necesaria para sustentar teóricamente al proyecto.

### **CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL.**

En este capítulo se presenta un análisis del robot móvil separando sus partes componentes y estudiarlos de forma particular para conocer sus características de funcionamiento.

### **CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES AL ROBOT MÓVIL.**

El capítulo engloba la implementación de los Codificadores ópticos incrementales y Sensores infrarrojos por reflexión a objeto, con los cálculos correspondientes, su circuito electrónico y su ubicación dentro de la plataforma móvil.



# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO



## 1.1 Introducción.

La robótica móvil surge como necesidad de extender el campo de aplicación de la Robótica, restringida en sus inicios por manipuladores fijos en uno de sus extremos. Es por ello, que para contar con la capacidad de desplazamiento y movilidad en los últimos años la investigación sobre **robots móviles** está adquiriendo un gran desarrollo con la construcción experimental en laboratorios universitarios y a nivel de aficionado lo que está ocasionando que este tipo de investigaciones se fundamente esencialmente en conocimientos científicos. [10]

En este capítulo se introducirá la descripción de sensor, la clasificación más utilizada de los sensores en las aplicaciones de robótica móvil, el estudio de los sensores infrarrojos, el estudio de los codificadores ópticos incrementales, una breve descripción de otros sensores utilizados en aplicaciones de robótica móvil, una descripción de los sensores analógicos y digitales, así como la descripción de la conversión analógica/digital y digital/analógica, todo ello integra la información necesaria para el análisis de los sensores.

## 1.2 Descripción de un sensor.

Un sensor es un dispositivo de medición encargado de realizar la conversión de la variable que está midiendo a valores medibles de dicha magnitud, de tal manera que sea posible su procesamiento electrónico y posteriormente permita su manipulación para fines de monitoreo y control. Es decir, es un dispositivo que convierte variables físicas no eléctricas en eléctricas ya que en la actualidad se emplea casi con exclusividad el procesamiento electrónico. [1]

Por otra parte el tipo de señal eléctrica contiene información y sus parámetros varían de un dispositivo a otro, y por ello, es necesario acoplar a la salida de éste un circuito de acondicionamiento de señal encargado de amplificar, modular y en general de procesar las señales para proporcionar a su salida una señal eléctrica normalizada, siguiendo pautas especificadas por el fabricante.

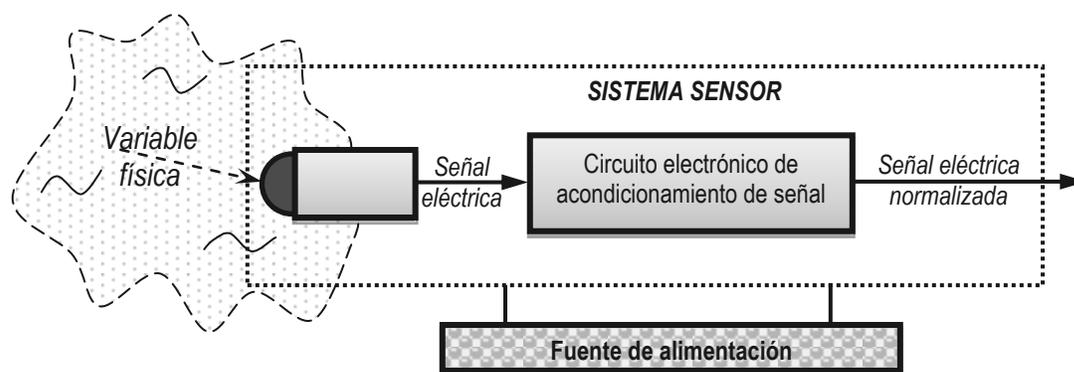


Figura 1: Componentes generales de un sensor.

### 1.3 Sensores internos y externos en robótica móvil.

Para el estudio de los sensores en robótica se les ha clasificado de diversas formas atendiendo distintos puntos de vista. En la aplicación dentro de robótica móvil se puede clasificar a los sensores para proporcionar información el estado interno del robot y para la interacción con el entorno. Cuando esta información es captada por sensores integrados en su estructura mecánica se les denomina *internos*. Por el contrario toda información captada que provenga del entorno próximo al robot son los denominados *externos*. [7]

#### 1.3.1 Sensores internos

Los *sensores internos* suministran información del estado interno del robot y han sido cronológicamente los primeros sensores utilizados encontrándose actualmente en la mayoría de los robots. Esta información permite el conocimiento de una serie de parámetros o características internas del sistema, para asegurar su funcionamiento con resultados satisfactorios. Tales características son muy diversas y se intentaran controlar unas u otras en función de las necesidades del robot, como por ejemplo: control de sus actuadores, medidas para la recarga de baterías, posición de sus ejes de giro, control de sus trayectorias, entre otras. Este tipo de información no toma en cuenta su entorno y seguirá sus instrucciones sin importar lo que suceda a su alrededor [13].

#### 1.3.2 Sensores Externos

En contraposición los *sensores externos* determinan el estado del robot en función de la percepción del entorno y los aspectos externos al robot, es decir, surgen como la necesidad de conocer aspectos de su alrededor para poder llevar a cabo sus actividades como por ejemplo, reconocimientos y localización de objetos, seguimiento de marcas, información visual, etc. Sin embargo puede haber grandes diferencias entre los sensores utilizados cuando un robot trabaja en un entorno estático donde se conoce lo que ocurre a su alrededor y los sensores utilizados cuando el robot debe trabajar en un entorno dinámico, es decir, que cambia con el transcurrir del tiempo y se desconocen los cambios que pueden ocurrir a su alrededor [5].

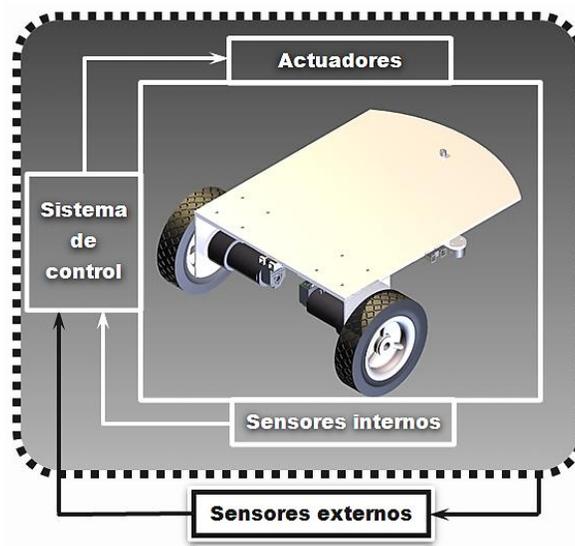


Figura 2: Robot móvil con información suministrada por sensores internos y externos.

## 1.4 Sensores infrarrojos.

Este tipo de sensores utiliza la parte del espectro infrarrojo, que es invisible por el ojo humano. Debido a que presentan menos interferencias que la mayoría de los sensores de luz, los sensores infrarrojos se utilizan frecuentemente para aplicaciones de seguimiento o evitación de obstáculos (reflexión sobre objeto) en robótica móvil, ya que proporcionan información acerca de si hay o no un obstáculo en su cono de detección.

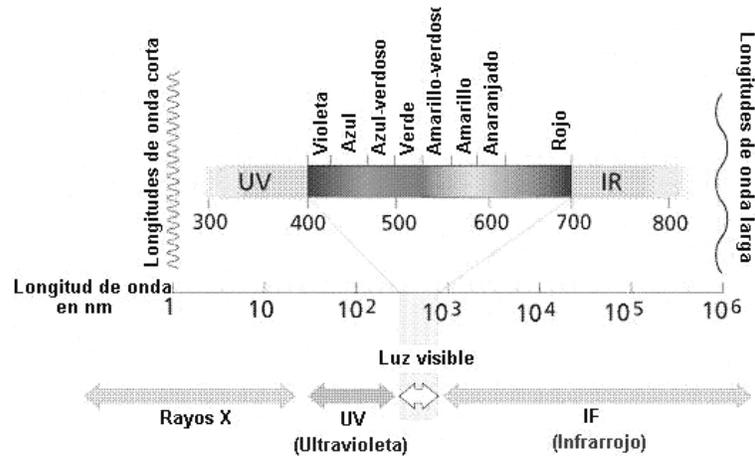


Figura 3: Espectro de radiaciones de luz.

Estos sensores infrarrojos por reflexión sobre objeto constan de un elemento emisor de luz y otro receptor, montados sobre la misma carcasa. Cabe mencionar que el fabricante suministra una gráfica que representa el rango de operación y especifica la zona de detección. Además de un factor de reflectividad sobre objeto que influye en gran medida en la distancia de detección. A continuación se muestran los elementos que lo componen [3]:

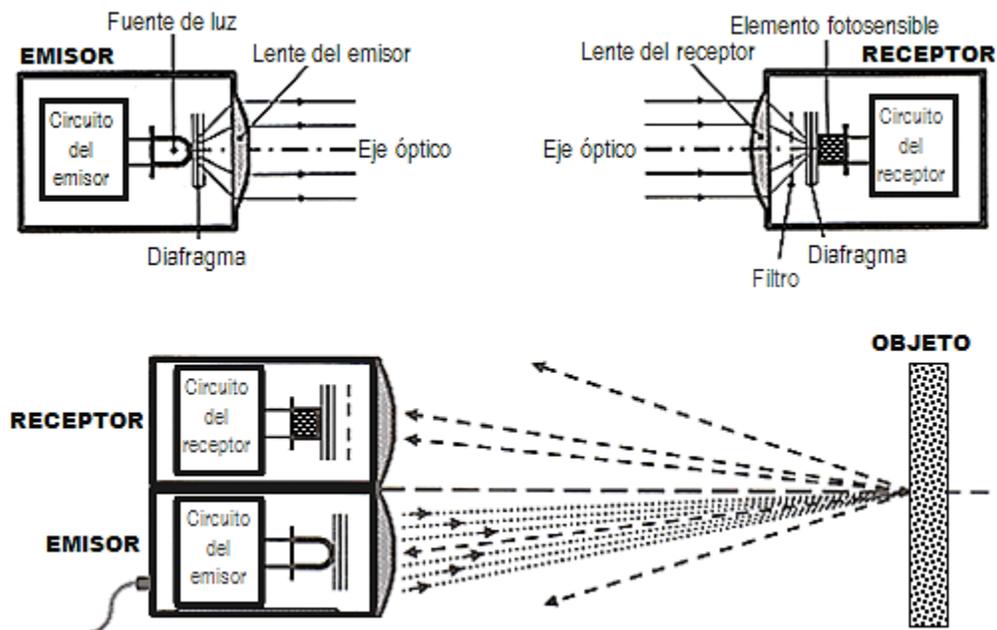


Figura 4: Esquema general del funcionamiento de un sensor infrarrojo

### Elementos del emisor.

- **Circuito del emisor.**-este envía a la fuente luminosa impulsos de corriente para que salgan de ella impulsos de luz, de esta forma se logra aplicar una mayor potencia, un mayor alcance y además de que el receptor se puede hacer más sensible.
- **Fuente de luz.**- normalmente un LED de infrarrojos, porque en el rango de longitudes de onda correspondientes se obtiene mayor potencia y rendimiento.
- **Lente emisor.**-se coloca para que los rayos luminosos que la atraviesan salgan del dispositivo emisor paralelos al eje óptico de la misma, debido a que la fuente de luz emite una radiación que se propaga en todas las direcciones.
- **Diafragma del emisor.**-se coloca entre la fuente de luz y la lente del emisor, formando un único rayo lo más concentrado posible con el fin de incrementar el carácter puntual de la fuente luminosa y conseguir una mayor concentración del haz de luz infrarroja

### Elementos del receptor

- **Lente del receptor.**-se coloca de manera que los rayos de luz infrarroja procedentes del emisor incidan correctamente sobre el receptor, con el fin de incrementar la sensibilidad del elemento fotosensible.
- **Elemento fotosensible.**- cuando la luz incide sobre él se modifica el valor de alguno de sus parámetros característicos.
- **Circuito del receptor.**- este circuito amplifica la señal eléctrica generada por el elemento fotosensible si la frecuencia de los impulsos que recibe coinciden con la frecuencia de los impulsos que envía el emisor y establece la señal de salida a partir de ella.
- **Diafragma del receptor.**-se coloca para evitar en lo posible la luz que no procede del emisor limitando el ángulo de recepción de luz infrarroja.
- **Filtro óptico.**- evita el paso del espectro luminoso procedente del entorno, susceptibles de causar problemas de interferencias, sólo dejando pasar la luz del emisor.

A continuación describiremos algunos elementos fotosensibles:

El **fotodiodo** transforma la energía de los fotones de luz en corriente eléctrica, sin embargo como la corriente generada es muy pequeña siempre necesita de un circuito amplificador [12].

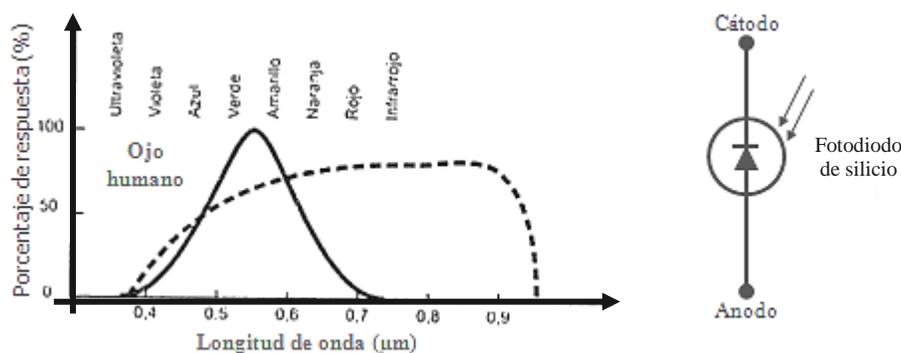


Figura 5: Curva de respuesta de un fotodiodo.

El **fototransistor** pasa de corte a conducción cuando incide luz sobre él, este elemento actúa como amplificador de corriente eléctrica generada por un fotodiodo.

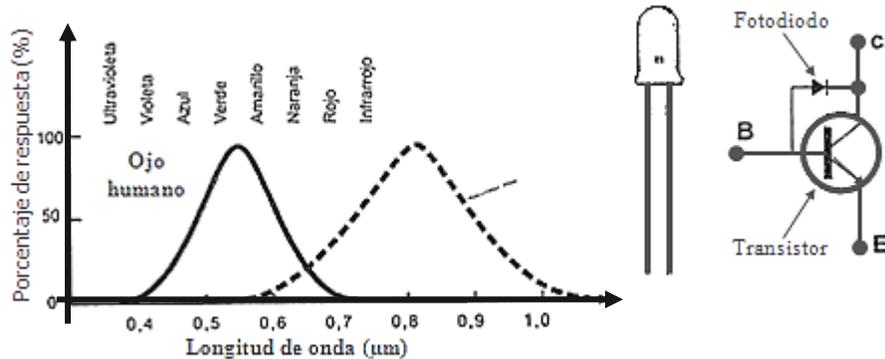


Figura 6: Curva de respuesta de un fototransistor.

El **campo de trabajo** de estos sensores está formado por la intersección del campo de emisión y el campo de recepción, además de que la reflectividad del objeto influye en gran medida en la distancia de detección. Existe también una zona muerta en la que no se garantiza la detección del objeto, esta zona debe ser tomada en cuenta cuando se pretende detectar objetos que están situados muy próximos al sensor, tal como se muestra en la siguiente figura:

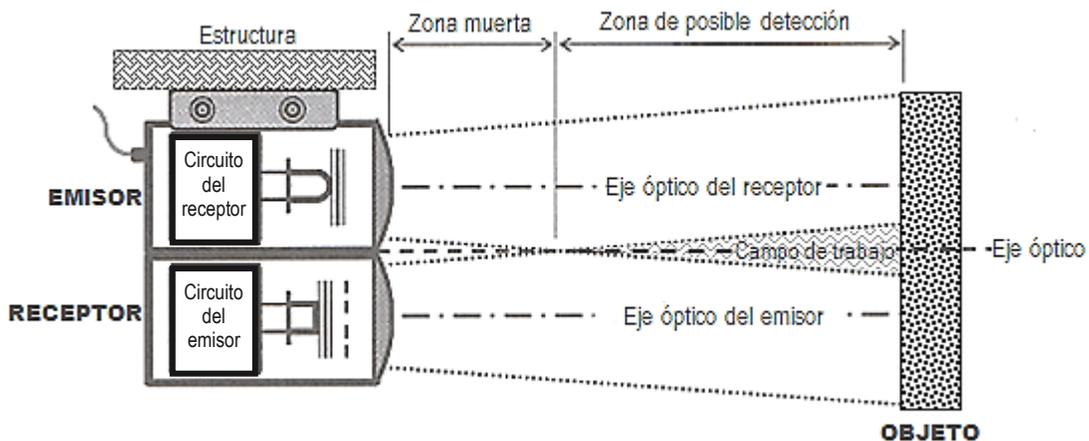


Figura 7: Campo de trabajo de un sensor infrarrojo.

Por otra parte, para utilizar correctamente estos sensores es necesario tomar en cuenta las siguientes características o efectos: cuando la posición del objeto en la que se activa no coincide con la posición en la que se desactiva, la distancia entre ambas posiciones se denomina también distancia diferencial. Se puede presentar cuando el objeto se mueve axialmente sobre el eje óptico) o cuando lo hace en dirección transversal al eje óptico [3].

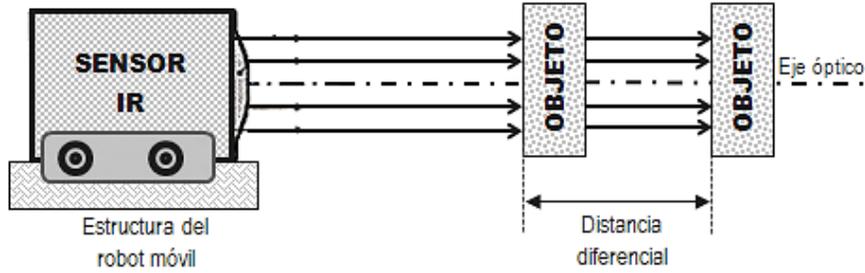


Figura 8: Sensor de luz infrarroja cuando el objeto se mueve axialmente al eje óptico.

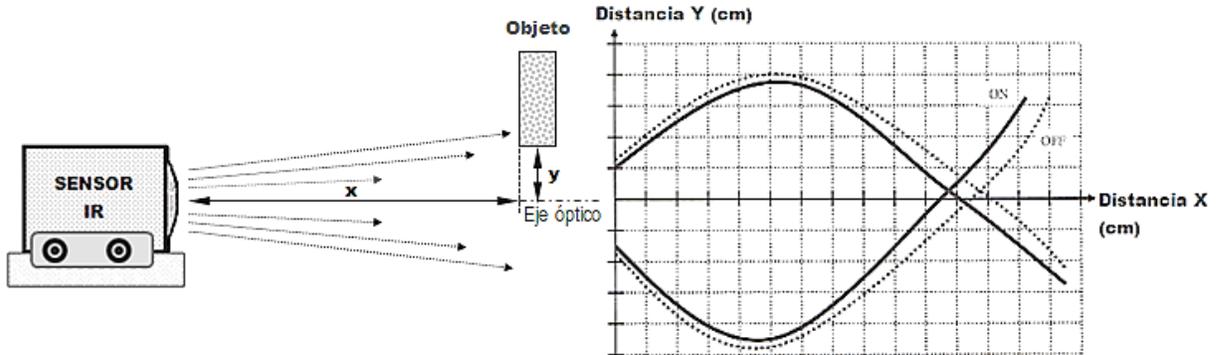


Figura 9: Sensor de luz infrarroja cuando el objeto se mueve transversalmente

## 1.5 Codificadores ópticos incrementales.

En la actualidad los codificadores ópticos son los más empleados en las aplicaciones de robótica en el control de motores eléctricos porque traducen el movimiento de los mismos en señales eléctricas de trenes de impulsos. Se estima que más del 70% de todas las aplicaciones de control de motores emplean codificadores como sensores de posición.

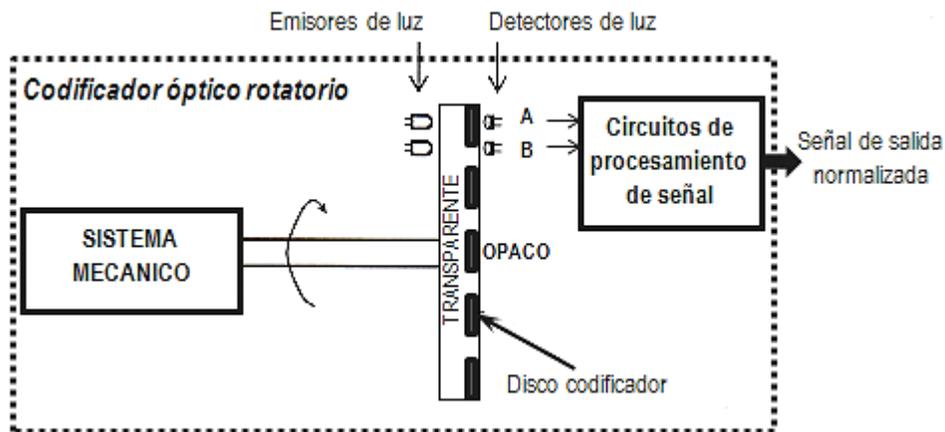


Figura 10: Esquema de funcionamiento de un codificador óptico incremental

Los codificadores ópticos incrementales son más habituales que los absolutos porque son más sencillos de fabricar y llegan a ofrecer altas resoluciones, sin embargo es necesario emplear más circuitería y programas para interpretar las señales de salida.

De forma general en estos codificadores existe una banda regular de marcas transparentes y opacas uniformemente distribuidas en un patrón del disco codificador incremental que al girar producen un cambio de estado del detector. El detector se activa y se desactiva cada vez que las marcas en el disco permiten pasar la luz, este cambio equivale a un cambio en la posición angular del eje y se puede medir contando el número de cambios de estado de la salida del detector [pulsos de detección] desde una posición cero o de referencia marcada en el disco.

El movimiento en cualquier dirección a partir de este punto genera un tren de pulsos mediante dos parejas emisor/receptor desfasados para que dependiendo del sentido de giro, sea uno u otro el que reciba el primer pulso de salida, los cuales se diferencian en dos canales de salida del codificador. [12]

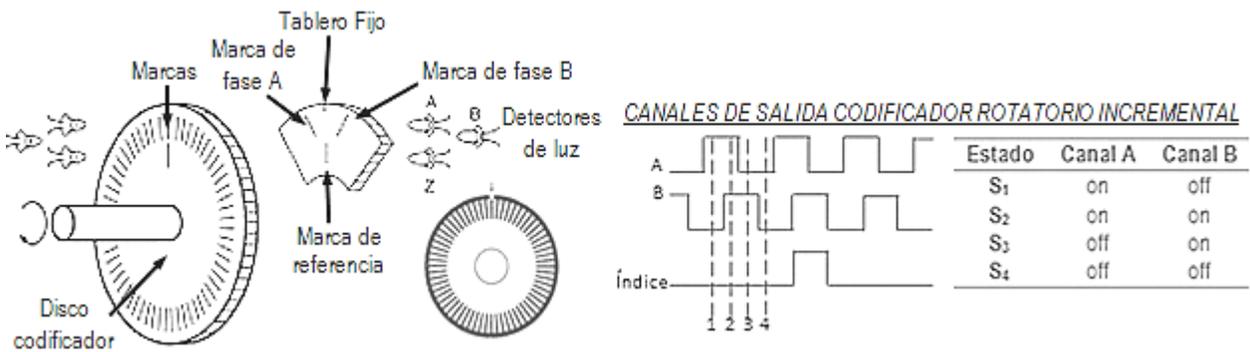


Figura 11: Esquema de las marcas de un codificador óptico incremental y sus canales de salida.

Por ejemplo los pares en “A” y “B” de un codificador incremental que producen ondas cuadradas separadas (pulsos de detección) con un ángulo de desfase de 90°. Si “A” se adelanta a “B” en 90°, el disco rota en sentido anti horario, por el contrario, si “B” se adelanta a “A” en 90°, el disco rotaría en sentido horario, en la figura 12 se muestran las secuencias de uno y otro caso.

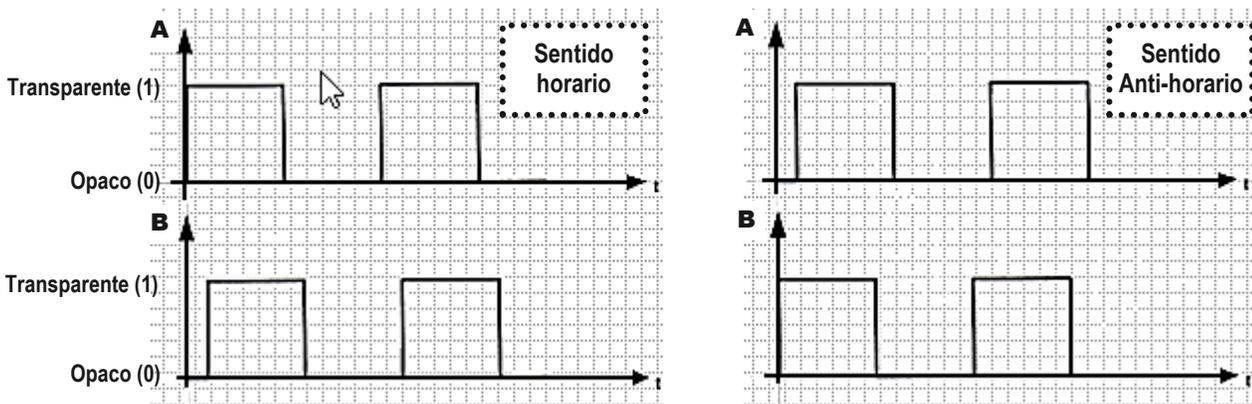


Figura 12: Pulsos generados cuando gira en sentido horario y anti horario.

El diagrama muestra que la posición puede determinarse al contar la salida de los canales de salida A y B (incremento o decremento) de los pulsos de detección dependiendo de la dirección de desplazamiento y puede ser controlados mediante un contador que sigue los movimientos.

Consecuentemente la resolución de los codificadores incrementales depende del número de marcas que presenta, supongamos que hay 300 líneas sobre el disco, por lo tanto, la salida del detector cambiará de estado las mismas veces por revolución del disco (pulsos de detección). Cada pulso del detector significa  $360^\circ/300$  de cambio de posición angular del eje, por lo tanto se tiene una resolución de: [12]

$$\frac{360^\circ}{300} = 1.2^\circ/\text{pulso}$$

Es conveniente colocar el codificador en el eje de salida del motor antes de la reductora, siempre y cuando sea posible, ya que se obtiene una mejor resolución que colocándolo después de ella. Por ejemplo, siguiendo con los datos anteriores para la salida de un motor antes de la reductora con una relación de reducción de 100:1, se coloca el mismo codificador de 300 pulsos de detección por revolución y cuya salida se conecta a la rueda de un robot móvil. Bajo estas condiciones por cada vuelta de la rueda, el disco gira 100 veces y se generan 30000 pulsos por cada revolución de la rueda y la resolución que ofrece el codificador para el posicionamiento de la rueda llega a ser de [11]:

$$\frac{360^\circ}{30000 \text{ pulsos}} = 0.012^\circ/\text{pulso}$$

Por otra parte, en los robots móviles los codificadores se emplean en su forma más usual para saber cuánto se han desplazado las ruedas y su velocidad, mediante la información de sus canales de salida a un contador que determina la dirección de desplazamiento a partir de las relaciones de las señales de salida y en consecuencia el conteo de la posición aumenta o disminuye de acuerdo con las relaciones detectadas [pulsos de detección].

La frecuencia de conteo es proporcional a la velocidad y es necesario conocerla para estar seguros de captar toda la información que ofrecen los codificadores al contador electrónico.

$$f = \tau * \frac{CPR}{60 \text{ s}}; \text{ donde } \begin{matrix} f = \text{frecuencia de conteo (Hz)} \\ \tau = \text{velocidad del motor (rpm)} \\ CPR = \text{pulsos por revolución del codificador} \end{matrix}$$

Para realizar dicha medición a un microcontrolador estos necesitan comprobar el estado de la entrada donde se ha realizado la conexión del codificador para generar la representación digital de la dirección.

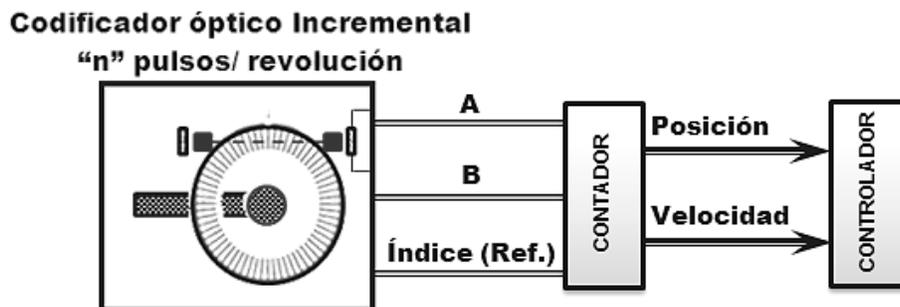


Figura 13: Diagrama de un codificador óptico incremental para el control de la posición y velocidad.

Por ejemplo, para leer la salida de un codificador con 150 pulsos por vuelta en un robot con sistema motriz diferencial cuya velocidad máxima es  $V=15\text{cm/s}$  y con  $r = 7.5\text{ cm}$  de sus ruedas, es preciso conocer la frecuencia mínima de muestreo de los dos codificadores para estar seguros de captar toda la información que ofrecen [5].

Con la velocidad máxima lineal del robot móvil  $V=15\text{cm/s}$ , la velocidad angular máxima en las ruedas (izquierda y derecha) es:

$$\omega_{\text{rueda}} = \frac{v}{r} = \frac{15\text{ cm/s}}{7.5\text{ cm}} = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{2\text{ rev}}{2\pi\text{ s}} = 0.318 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$$

$$\omega_d = \omega_i = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Como en cada vuelta un codificador genera 150 pulsos, se tiene que el número de pulsos generados cada segundo es:

$$f = \tau * \frac{\text{CPR}}{60\text{ s}}$$

$$f = 0.318 \frac{\text{rev}}{\text{s}} * 150\text{CPR} = 47.746\text{ Hz}$$

Para poder leer los dos canales del codificador el microcontrolador debería tener una frecuencia mínima de muestreo de:

$$47.746\text{ Hz} * 2 = 95.492\text{ Hz}$$

Es decir, un tiempo aproximado entre muestras de  $10.47\text{ ms}$ :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{95.492} = 0.01047 \frac{\text{s}}{\text{ciclo}}; \quad 10.47\text{ms}$$

El desempeño de un codificador se especifica por [1]:

1. **Resolución:** número de conteos por revolución (CPR), estos es el número de marcas en el disco para el caso del codificador incremental.
2. **Velocidad máxima:** es la velocidad máxima del codificador que puede estar limitada por razones eléctricas y mecánicas. Esto es en la capacidad de cambio de estado de los detectores, la cual se limita por la capacidad eléctrica y por los cojinetes mecánicos del codificador.
3. **Canales de salida del codificador:** A, B, C para codificadores incrementales de tres canales, Para la dirección del sentido de giro y un tercero de inicio o referencia.
4. **Tipo de señal de salida eléctrica:** tipo digital compatible para TTL.
5. **Limites mecánicos:** cargas máxima radial y axial, sellado para polvo y fluido, límites de vibraciones y temperatura.

Estos codificadores se emplean en un gran número de aplicaciones dada su simplicidad y economía. Por otro lado las principales limitaciones o desventajas con las que cuenta son:

- ❖ La información acerca de la posición se pierde cuando la alimentación al sistema falla.
- ❖ Siempre es necesario un circuito contador para obtener una salida compatible con el puerto de entrada/salida de un microcontrolador.
- ❖ Los codificadores pueden presentar problemas mecánicos
- ❖ La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias.
- ❖ Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones,
- ❖ El margen de temperatura de trabajo es limitado por la presencia de componentes electrónicos.

## 1.6 Otros sensores empleados en robótica móvil.

### 1.6.1 Sensores de ultrasonidos.

En Robótica móvil los ultrasonidos se emplean para medir la distancia a objetos, en la que un emisor envía una onda sonora en la dirección de detección, cuando dicha onda colisiona con un obstáculo, el eco que produce la onda de rebote se puede captar en el receptor ubicado en la misma carcasa. El receptor está asociado a un circuito electrónico que mide el tiempo que tarda en recibir el eco, limitado por la velocidad de propagación del sonido aprox. 343 m/s a temperatura ambiente [12].

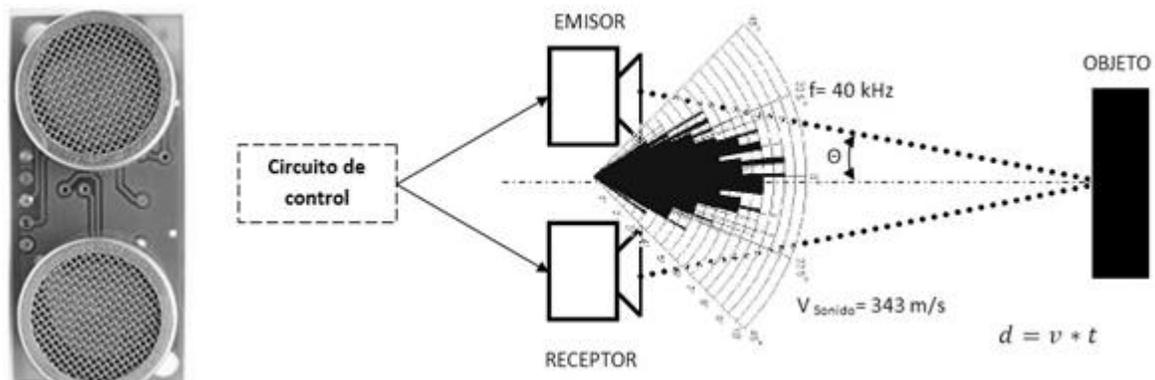


Figura 14: Diagrama de bloques de un sensor de ultrasonido.

### 1.6.2 Interruptor mecánico (Detectores por contacto).

Los sensores que detectan la presencia de un objeto se caracterizan porque la detección se produce cuando existe contacto físico entre el elemento sensor y un objeto rígido a detectar. El tipo de sensor más empleado para la detección por contacto es el *interruptor mecánico* tales como los habituales *finales de carrera* y los *Microrruptores* [3].

Los parachoques constituyen una aplicación muy habitual de los detectores de contacto en los robots móviles. De este modo, el robot móvil detecta la colisión con obstáculos en su entorno en las situaciones siguientes:

- **Detector de colisión (Parachoques).** con un objeto fijo o en movimiento que puede causar un vuelco.

- **Detector de acantilado.** Evitan que el robot caiga por barrancos o escalones frente a él.

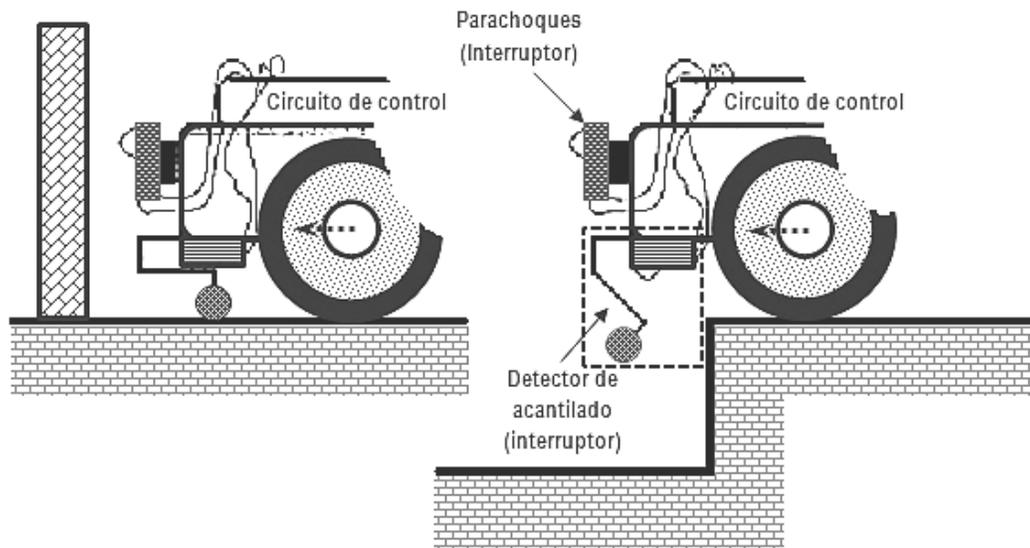


Figura 15: Aplicación de interruptores en los robots: parachoques y detector de acantilado.

### 1.6.3 Interruptores Gravitatorios.

Los interruptores gravitatorios se activan debido al efecto de gravedad terrestre que actúa sobre ellos, cambian de estado al variar su ángulo de inclinación respecto de la vertical. Apoyados a un robot móvil pueden detectar cambios bruscos de inclinación como su vuelco u otra circunstancia que modifique el ángulo de inclinación del eje del sensor [12].

Algunas posibles aplicaciones de estos interruptores a la robótica móvil pueden ser:

- **Detección de movimiento por pendientes peligrosas.**
- **Búsqueda del punto del terreno con mayor o menor altitud.**
- **Detección de agresión.**

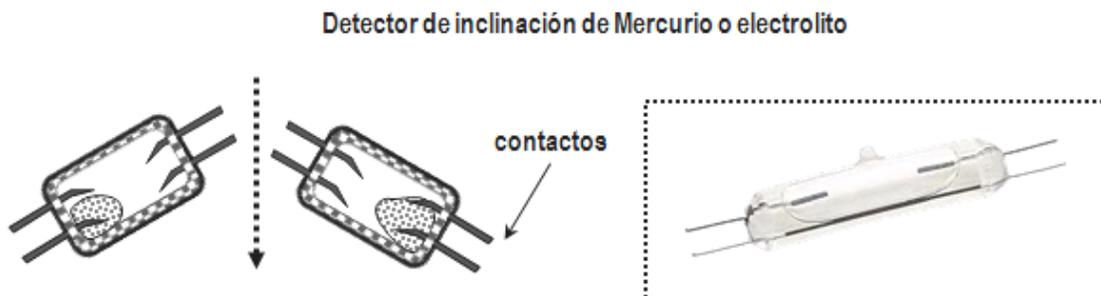


Figura 16: Esquema de un detector de inclinación de Mercurio o electrolito.

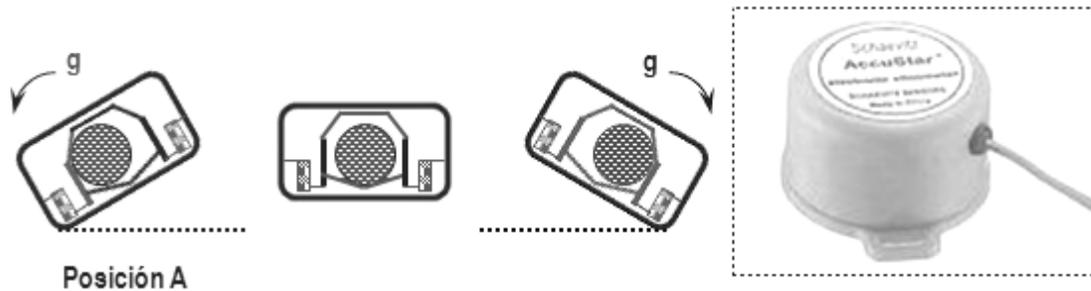


Figura 17: Esquema de un detector de inclinación de bola metálica.

Por otra parte, los sensores descritos anteriormente son los más frecuentes en los robots móviles, sin embargo, en aplicaciones más exigentes en las que el costo del robot no es un factor importante, se emplean adicionalmente otros tipos de sensores de los que describiremos brevemente algunos [12]:

#### 1.6.4 Codificadores ópticos absolutos.

Los *codificadores ópticos absolutos* producen un único código para cada posición angular del eje. El patrón de las bandas del disco codifica una posición absoluta del eje de giro, de modo que el conjunto de bits obtenidos en los receptores ópticos proporciona la posición del eje de con respecto a la posición de los receptores. Se emplea el código Gray ya que este código sólo cambia 1 bit entre posiciones digitales consecutivas y de esta manera se reducen los errores de lectura del codificador [14].

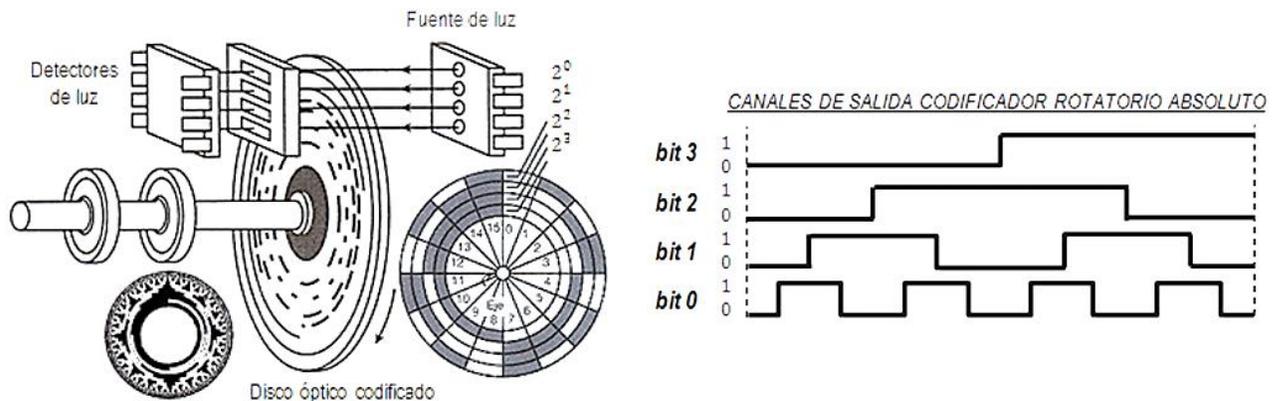


Figura 18: Esquema de un Codificador óptico absoluto y su sistema de codificación.

#### 1.6.5 Micrófonos.

Para dotar al robot de capacidad auditiva, se equipa a los robots con micrófonos, los cuales son muy baratos y su instalación es sencilla en los robots. La salida de un micrófono es una tensión analógica que se puede convertir en un código binario mediante un convertor A/D. Dependiendo de las exigencias de la aplicación se emplearían distintas frecuencias de muestreo. Con un micrófono es posible programar a un robot para que siga órdenes verbales y determine situaciones específicas caracterizadas por algún sonido en particular.



Figura 19: Micrófono para dotar de capacidad auditiva al robot móvil.

### 1.6.6 Cámaras de visión.

La idea de equipar a un robot con equipo de *visión artificial* resulta muy atractivo por la gran cantidad de información que proporcionan estos sistemas sensoriales sobre el entorno de trabajo. Una cámara de visión proporciona información de vídeo que es digitalizada para su procesamiento posterior en el controlador, el volumen de datos que aporta una imagen es tan grande que es necesario el uso de procesadores dedicados a realizar la digitalización. El procesamiento de imágenes para aplicaciones de Robótica móvil es un tema que en la actualidad constituye un área de estudio muy activa, ya que a partir del análisis de imagen se obtiene información para navegación, construcción de mapas de entorno, interacción con humanos, etc. [12].

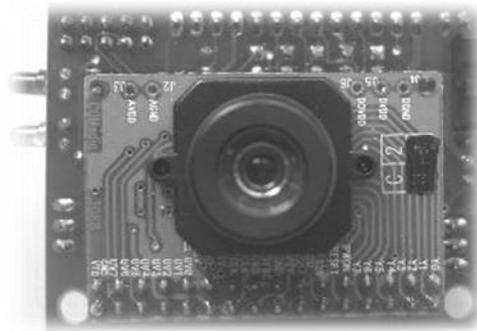


Figura 20: Cámara de visión artificial para aplicaciones de Robótica móvil.

## 1.7 Sensores analógicos y Sensores digitales.

*Los Sensores analógicos* son aquellos que generan señales eléctricas denominadas analógicas, que pueden tomar cualquier valor dentro de unos determinados márgenes de tiempo y llevar información en su amplitud. El mundo físico es en general analógico y por ello la mayoría de los sensores proporcionan señales analógicas. Sin embargo, las señales eléctricas generadas por los sensores analógicos padecen de problemas relacionados con la presencia de ruido, interferencias y distorsión, sobre todo si se han de transmitir a distancias relativamente grandes, y por ello es indispensable un circuito electrónico de acondicionamiento de señal [3].



Figura 21: Diagrama de bloques de un sensor analógico.

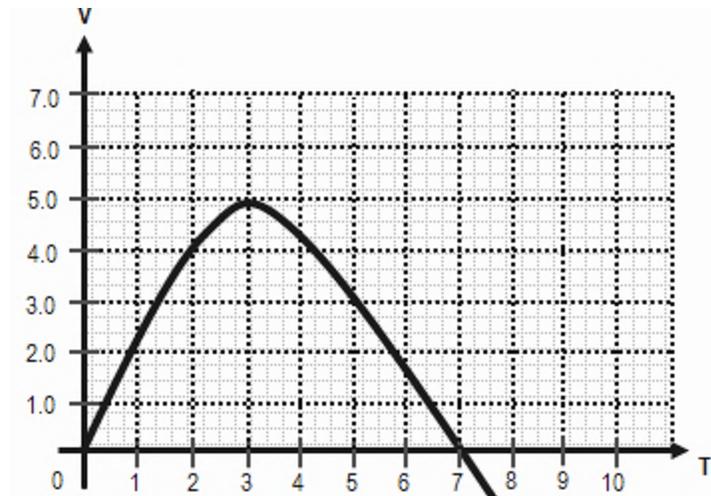


Figura 22: Señal analógica con valores entre 0 y 5 Volts.

**Los Sensores digitales** generan señales eléctricas (acotadas) que solo toman un número finito de niveles o estados entre un máximo y un mínimo, y por ello reciben el nombre de digitales. Las señales digitales más utilizadas son las binarias, ya que solo pueden tener dos niveles de tensión o voltaje que se asignan a los números binarios 0 y 1. Una variable binaria recibe el nombre de “bit”. Para representar una información se necesita un cierto número  $n$  de variables binarias cuyo valor depende de la precisión que se desee [13].



Figura 23: Diagrama de bloques de un sensor digital

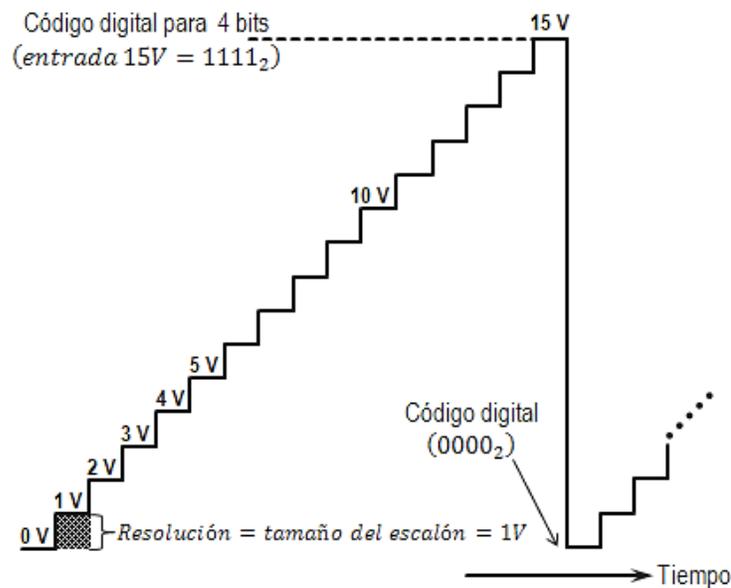


Figura 24. Código digital para 4 bits para un valor acotado entre 0 y 15V.

### 1.8 Conversión A/D y D/A.

La información proporcionada por los sensores se debe convertir en un valor que pueda ser interpretado y manipulado por un controlador. La mayoría de las variables físicas son de naturaleza analógica y en muchos casos el método de conversión analógico-digital emplea el proceso de conversión digital-analógico, en el siguiente diagrama se muestran los elementos que participan cuando un controlador, monitorea y controla una variable física que se supone es analógica [13]:

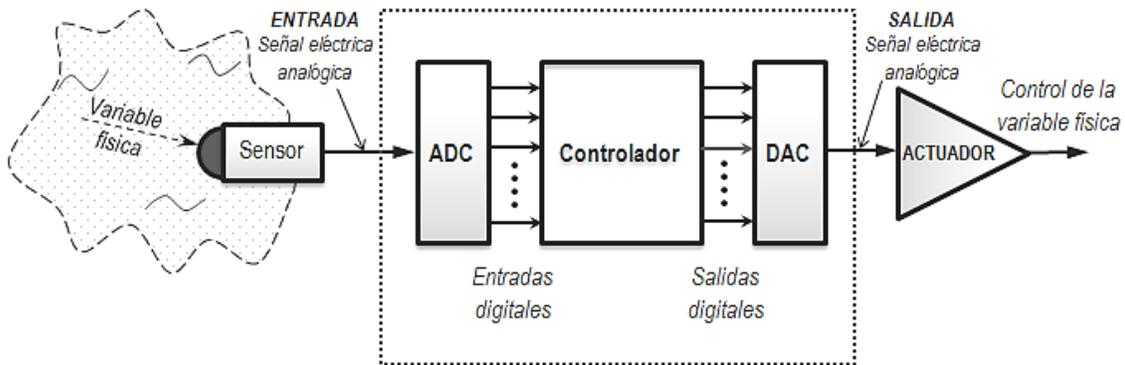


Figura 25: Convertidor A/D y D/A, para un controlador que pueda monitorear y controlar una variable física.

La salida analógica del sensor sirve como entrada para el convertidor analógico-digital (ADC) de un controlador, este convierte la entrada analógica en una salida digital. Es decir, toma un valor analógico de entrada y después de cierto tiempo produce un código digital de salida representado por un número de bits “n”(valores binarios) que son proporcionales al valor de la entrada analógica y por consiguiente la cantidad de códigos empleados por el controlador para realizar la discretización del valor analógico.

En la tabla siguiente se puede ver un ejemplo de cómo se comportaría un ADC para distintos rangos de valores de entrada entre 0 y 5 V, y obtener un valor de salida binario comprendido de 0 a 255 para un conversor de 8 bits. Esto resulta en un incremento o tamaño de escalón que se va a incrementar en 0.0196 V desde 0 a  $(2^8 - 1) = 255$  valores binarios.

Tabla 1: Tabla de valores de voltaje entre 0 y 5 V

Voltaje [V]	Tamaño de escalón [V]	Posición decimal	Código binario
5	0,019607843	255	11111111
4,5	0,019607843	229,5	11100101
4	0,019607843	204	11001100
3,5	0,019607843	178,5	10110010
3	0,019607843	153	10011001
2,5	0,019607843	127,5	01111111
2	0,019607843	102	01100110
1,5	0,019607843	76,5	01001100
1	0,019607843	51	00110011
0,5	0,019607843	25,5	00011001
0	0,019607843	0	00000000

Por otra parte esta salida digital del controlador se conecta a un convertidor digital-analógico (DAC) que la convierte en un valor analógico proporcional al código digital, es decir, este toma un valor representado en código digital (como binario directo) y lo convierte en un valor analógico. Esta salida analógica del (DAC) con frecuencia se conecta a algún dispositivo o circuito que sirve como actuador para controlar la variable física.

En la figura siguiente se muestra un controlador para el control de la velocidad de un motor. La corriente analógica es de 0 a 2mA del DAC se amplifica para producir velocidades de 0 a 5200 rpm [13].

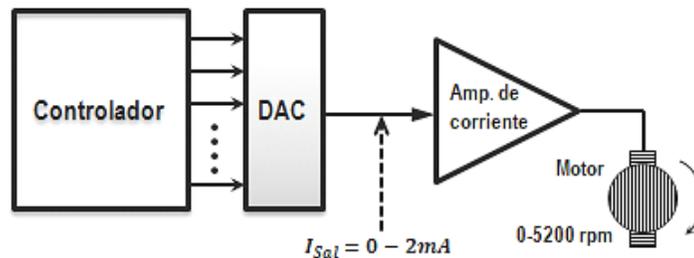


Figura 26: Control de la velocidad de un motor.

Usando 8 bits ¿Qué tan próxima a 4500 rpm se puede ajustar la velocidad del motor?

Sabemos que el número de escalones es  $(2^n - 1)$  y por lo tanto podemos decir que habrá  $(2^8 - 1) = 255$  escalones. Así la velocidad del motor se incrementara en escalones de:

$$\frac{5200rpm}{255} = 20.392rpm.$$

El número de escalones necesarios para llegar a 4500 rpm es:

$$\frac{4500rpm}{20.392rpm} = 220.67$$

Este no es un número entero del escalón y por lo tanto, se redondeara a 221. Entonces la velocidad real del motor en el escalón 221 será:

$$221 * 20.392rpm = 4506.666rpm.$$

Así, el controlador debe proporcionar a la salida el equivalente binario de 8 bits de  $221_{10}$  para producir la velocidad deseada del motor dentro de la resolución del sistema.

## 1.9 Dispositivos de Entrada/Salida.

La conexión entre los sensores/actuadores y el controlador de un sistema puede ser de distintos tipos dependiendo del medio físico empleado. Las interfaces se encargan de adaptar el nivel de las señales eléctricas entre los distintos dispositivos.

El microcontrolador está diseñado para usarse como controlador implantado que ayuda a monitorear y controlar la operación, en este caso del sensor. Es decir, son microcomputadoras con la diferencia de que los dispositivos de entrada/salida que usan son mucho más pequeños dentro del mismo circuito integrado en un solo chip.

El microcontrolador se comunica a través de la configuración de sus puertos y estos están constituidos por líneas digitales de entrada/salida, que trabajan con valores binarios de hasta 12 bits. Estas líneas digitales son capaces de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación es de 5 V:

$$\begin{aligned} 0 \text{ V a } 0.8 \text{ V} &= \text{lógico 0} \\ 2 \text{ V a } 5 \text{ V} &= \text{lógico 1} \end{aligned}$$

A cualquier voltaje por debajo del rango 0 a 0.8 V se le da el valor digital 0 y a cualquier voltaje en el intervalo de 2 a 5 V se le asigna el valor digital 1.

Un punto importante a la hora de trabajar con ellos es que algunos tienen la posibilidad de transformar las señales analógicas en señales digitales mediante el uso de un conversor analógico-digital y entregar a sus salidas un bus de bits, que permita tomar decisiones en base a la lectura obtenida según se programe, es decir, pueden ser configuradas como entradas para recibir datos o como salidas para gobernar dispositivos externos. Para el caso de un robot móvil los sensores están muy próximos al microcontrolador y por tanto la conexión se realiza directamente a sus entradas. Debido a sus múltiples aplicaciones los microcontroladores son muy utilizados en la actualidad para la realización de proyectos [8].

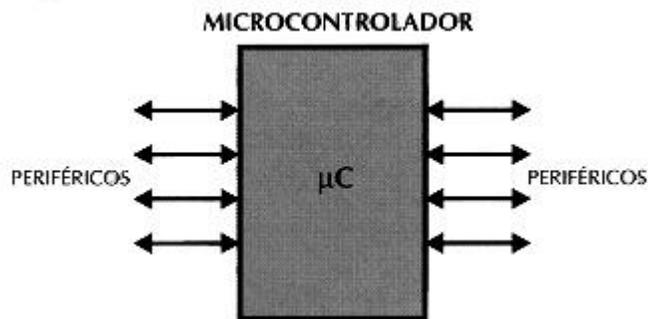
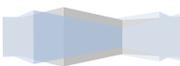


Figura 27: Microcontrolador con sus periféricos de entrada/salida.

# CAPÍTULO II

## CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL



## 2.1 Introducción

La mayoría de los robots móviles poseen características particulares que los hacen aptos para una determinada tarea. Es la tarea misma la que determina en una primera etapa las particularidades del robot que van desde la estructura mecánica, el tipo y disposición de las ruedas, los actuadores que proporcionan tracción y la forma física del robot.

En este capítulo se presenta un análisis del robot móvil tipo diferencial, empezando a separar sus partes componentes y estudiarlos de forma particular, ya que de acuerdo a sus características particulares, nos permitirá obtener los cálculos necesarios para el correcto funcionamiento de los sensores.

## 2.2 Sistema motriz diferencial.

Este sistema está compuesto por dos ruedas motrices que son accionadas por sus motores independientes. Estas ruedas motrices por lo regular se colocan en la parte delantera y a su vez es necesario instalar una rueda libre en la parte trasera para estabilizar la estructura mecánica del robot móvil [7].

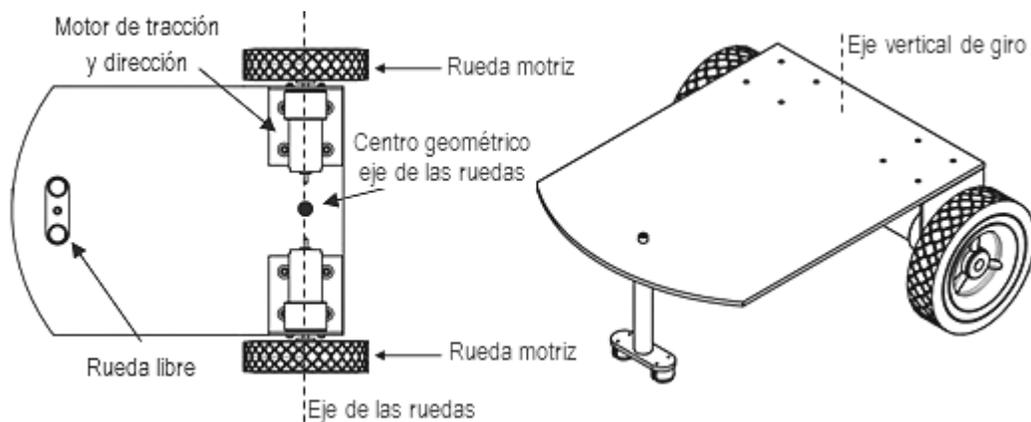


Figura 28: Configuración del sistema motriz diferencial.

Con este tipo de sistema motriz el control de la trayectoria del vehículo se consigue ajustando la velocidad de giro de ambas ruedas motrices, así cuando ambas ruedas giran con idéntica velocidad y en el mismo sentido, el vehículo describe una línea recta. Por el contrario si las velocidades son diferentes o son opuestas se consigue un cambio de dirección y el móvil describe una trayectoria curvilínea. Es importante mencionar que este tipo de sistema permite que el robot gire sobre sí mismo, esto es sobre un eje vertical al plano del robot, pasando por el centro geométrico del eje que une las ruedas motrices, como se muestra en la figura 28.

A pesar de la sencillez mecánica del sistema motriz diferencial, seguir una trayectoria recta supone un problema más complejo de lo que pudiera parecer a simple vista. Como se ha mencionado anteriormente el movimiento en línea recta se consigue cuando ambas ruedas motrices giran en el mismo sentido con idéntica velocidad y cabría pensar que esto se consigue aplicando idéntica tensión eléctrica a los motores, sin embargo, no sucede así debido a las pequeñas diferencias existentes, tanto en motores, como en las fuerzas aplicadas a las ruedas.

Para garantizar que el sistema diferencial proporcione la igualdad de velocidad de ambas ruedas motrices se pueden diseñar un sistema con el uso de codificadores de posición. En general este tipo de robot permite ventajas que se derivan de su estructura mecánica y de la implementación de la electrónica de control lo que hacen de esta configuración la preferida para robots de estudio, como es el caso.

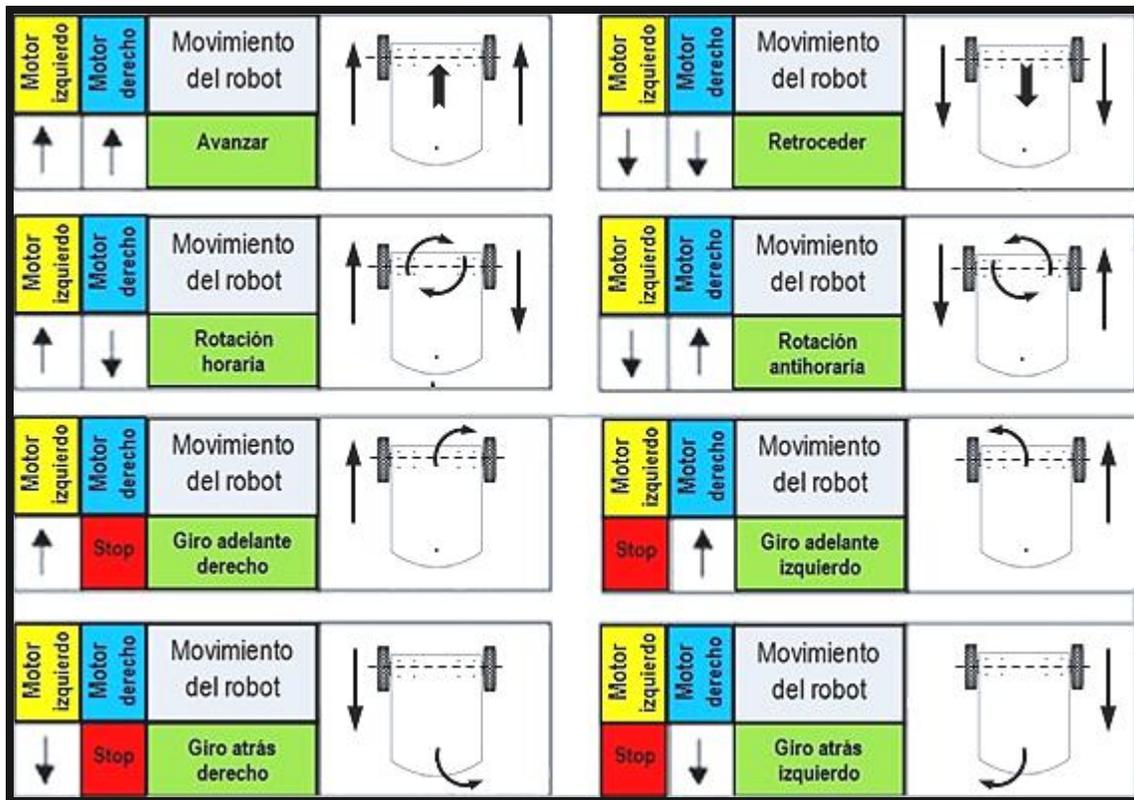


Figura 29: Diagrama de los desplazamientos de Robot móvil tipo diferencial.

### 2.2.1 Parámetros y variables relacionadas con el movimiento del robot móvil

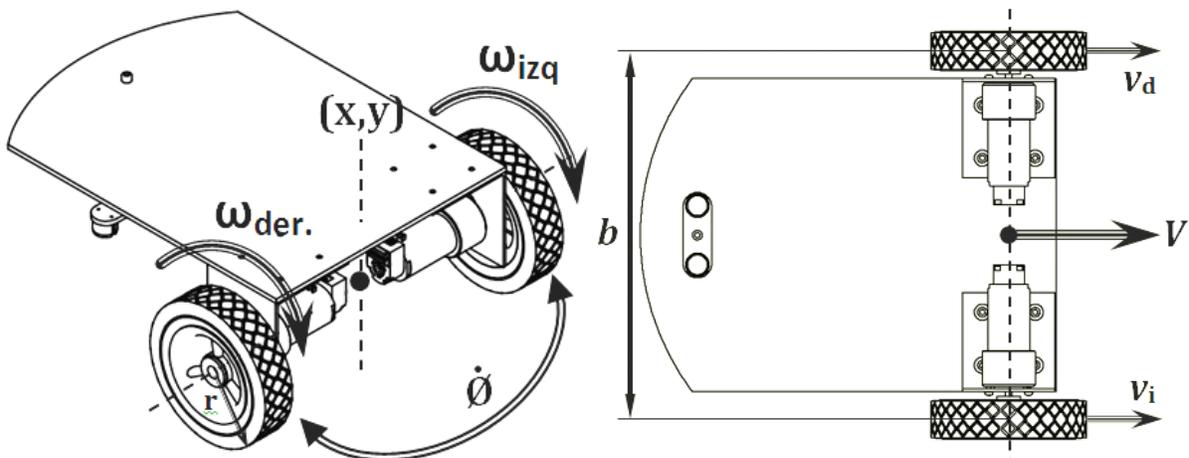


Figura 30: Parámetros del robot móvil tipo diferencial.

Los parámetros y variables que se muestran en la figura 31 son:

- Las velocidades angulares de las ruedas  $\omega_i$  para la rueda izquierda y  $\omega_d$  para la rueda derecha.
- Longitud del eje (o distancia entre las ruedas) denominada  $b$ .
- El radio de cada rueda  $r$ .
- La velocidad angular que posee el cuerpo  $\dot{\phi}$  ( $\dot{\phi} = W$ )
- La velocidad lineal que posee el cuerpo del robot  $V$ .

### 2.2.2 Posición del robot en el espacio

Esta posición queda definida por las coordenadas bidimensionales del centro de masa  $(x, y)$  y el ángulo entre la dirección del movimiento del robot y el eje  $X$ , denominado  $\phi$ .

Teniendo en cuenta las ecuaciones cinemáticas que relacionan la velocidad de giro de cada rueda con las variables de la posición de robot denotadas como  $(x, y, \phi)$ . Se podrá considerar al robot como un cuerpo rígido, entonces se puede obtener la velocidad lineal  $V$  del robot en base al promedio de las velocidades lineales de sus extremos, que es donde se encuentran las ruedas.

La velocidad lineal de cada rueda se obtiene multiplicando la velocidad angular por el radio de las ruedas, es decir:

$$v_i = \omega_i r \quad \text{y} \quad v_d = \omega_d r$$

Entonces la velocidad  $V$  del robot queda definida por:

$$V = \frac{v_i + v_d}{2} = \frac{\omega_i r + \omega_d r}{2} \quad (\text{ec. 1})$$

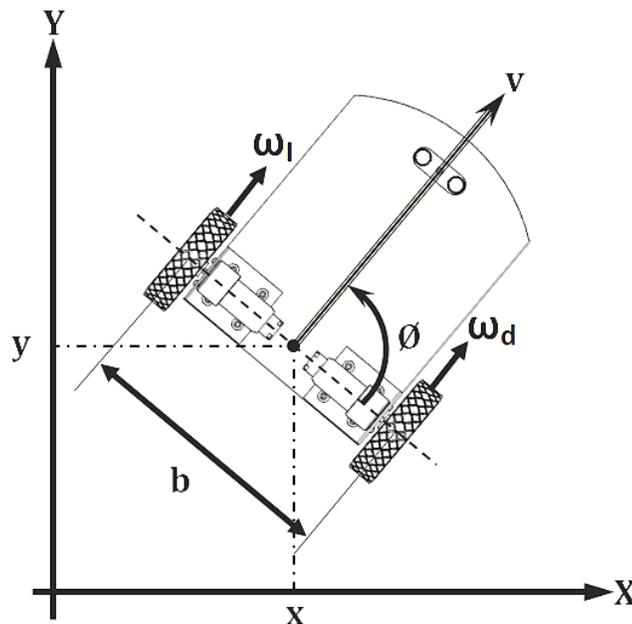


Figura 31: Parámetros del robot móvil en el plano  $(x, y)$

Las ecuaciones cinemáticas del punto medio del eje entre las ruedas motrices son:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V(t) \cos \phi(t) \\ \dot{y} &= V(t) \sin \phi(t) \\ \dot{\phi} &= W(t)\end{aligned}$$

Donde  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  y  $\dot{\phi}$  son derivadas con respecto al tiempo de  $x$ ,  $y$  y  $\phi$  respectivamente, es decir, la velocidad lineal  $V(t)$  de robot en la dirección de  $x$  e  $y$  con la velocidad angular  $W(t)$ . Si se especifican la velocidad lineal  $V$  y angular  $\omega$  del vehículo para el giro sobre la vertical, las velocidades de giro en cada rueda son:

$$\omega_i = \frac{V - (b/2)\omega}{r} \quad y \quad \omega_d = \frac{V + (b/2)\omega}{r}$$

La posición y orientación del móvil se obtienen integrando las velocidades del móvil en un periodo de tiempo  $\Delta t$ .

$$x(t) = X(0) + \int_0^t V \cos(\tau) d\tau \quad (ec2)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t V \sin(\tau) d\tau \quad (ec3)$$

$$\phi(t) = \phi(0) + \int_0^t \frac{\omega_i r - \omega_d r}{b} d\tau \quad (ec4)$$

Hay que mencionar que la estimación de la posición mediante estas expresiones son válidos solo para periodos de tiempo pequeños, ya que si usamos periodos de tiempo muy grandes se produce una acumulación de error dados por la interacción que tiene el vehículo con el terreno, como pudieran ser los deslizamientos que existan entre la rueda y el piso, estos tipos de interacciones no están contemplados en el modelo matemático.

### 2.3 Estructura mecánica.

La estructura mecánica o chasis está diseñada en aluminio donde se alojan todos los elementos de los que consta el robot móvil y su forma geométrica se puede observar en la sección de Apéndices en Planos del diseño. Dentro de esta base principal o chasis se tienen las operaciones de barrenado para la sujeción mediante tornillos de todas las partes que componen la estructura mecánica [2]. Una forma práctica de calcular la masa de una placa de aluminio es conocer su densidad la cual es  $\delta_{Al} = 2.70 \text{ g/cm}^3$  ó  $2710 \text{ kg/m}^3$ . Tenemos que de acuerdo a las

medidas del chasis:

$$m_{Al} = V_{pieza} * \delta_{Al} = \text{largo} * \text{ancho} * \text{altura} * \delta_{Al} \quad (ec. 4)$$

$$40\text{cm} * 30\text{cm} * 0.5\text{cm} * \frac{2.7 \text{ gr}}{\text{cm}^3} = 1620 \text{ gr} = 1.620 \text{ kg}$$

Para las escuadras se tiene:

$$20.02\text{cm} * 8.89\text{cm} * 0.3\text{cm} * \frac{2.7\text{ gr}}{\text{cm}^3} = 144.162\text{gr} = 0.144\text{kg}$$

Por 2 piezas se tiene:

$$2 * 144.162\text{gr} = 288.324\text{gr} = 0.288\text{kg}$$

Para la barra que sujeta a las ruedas esféricas libre se tiene:

$$\pi * r^2 * h * \rho = 3.14 * (0.95\text{cm})^2 * 13.1\text{cm} * \frac{2.7\text{ gr}}{\text{cm}^3} = 100.812\text{gr} = 0.100\text{kg}$$

Para abrazadera que sujeta la batería a la estructura:

$$29\text{cm} * 6.35\text{cm} * 0.1\text{cm} * \frac{2.7\text{ gr}}{\text{cm}^3} = 49.720\text{gr} = 0.497\text{kg}$$

Para el sujetador de las ruedas esféricas libres se tiene:

$$2.8\text{cm} * 8.2\text{cm} * 0.5\text{cm} * \frac{2.7\text{ gr}}{\text{cm}^3} = 30.996\text{gr} = 0.030\text{kg}$$

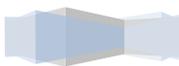
Se tiene una masa total de la estructura mecánica:

$$\begin{array}{r} 1620.000 \\ 144.162 \\ 288.324 \\ + 100.812 \\ 49.720 \\ \hline 2203.018\text{ gr} \end{array}$$

## 2.4 Actuadores.

Los actuadores encargados de proporcionar tracción a las ruedas motrices. En el estudio de los motores se encontró que no correspondían a ninguna serie proporcionada por el fabricante así que los únicos datos que se conocían eran las medidas correspondientes a la armadura, la velocidad de rotación 5200rpm y el voltaje de alimentación 12 V CD. Es necesario conocer sus características ya que en ellos se e implementará los codificadores de posición en cargados de controlar la trayectoria del robot móvil. Como primer dato tenemos las dimensiones de su armadura las cuales se muestran en la figura 33.

MARCA	# DE PARTE	ALIMENTACIÓN
GLOBE MOTORS	455A417-A02	12 CD



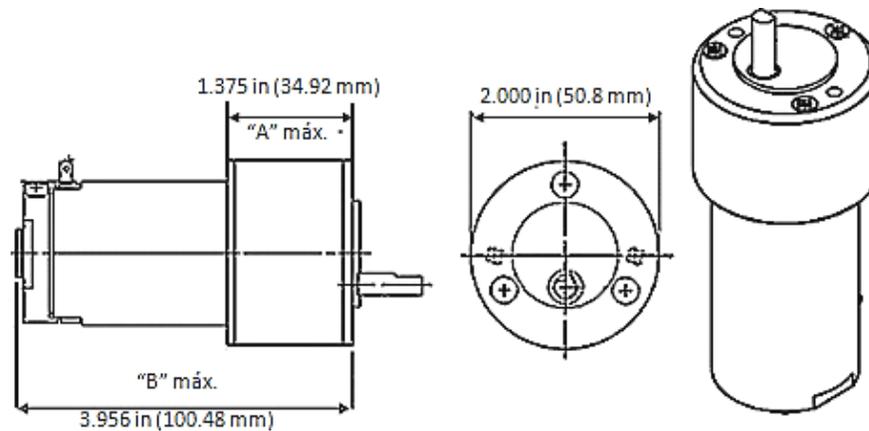


Figura 32: Dimensiones del Motor GLOBE MOTORS 455A417-A02.

De acuerdo a las medidas de la armadura y para conocer la relación de reducción del tren de engranes nos dimos a la tarea de destapar la caja reductora del motor para calcularla, de acuerdo a la definición básica de *valor del tren de engranes* ( $TV$ ) que representa la relación de velocidad de entrada del primer engrane del tren; entre la velocidad de salida del último engrane del tren. Es decir, es el producto de las relaciones de velocidades de los pares individuales de engranajes, cuando hay más de dos engranes en un conjunto que tenga uno motriz y uno conducido. Así su forma general para la relación de velocidades y el valor del tren es el siguiente [6]:

$$TV = \frac{\text{producto de los números de dientes en los engranes conducidos}}{\text{producto del número de dientes en los engranes conductores}} = \frac{\text{velocidad de entrada}}{\text{velocidad de salida}}$$

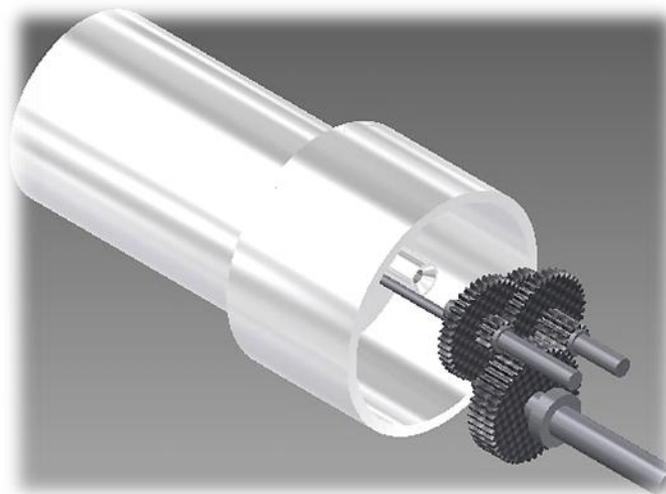


Figura 33: Conjunto de trenes de engranes de la caja reductora del Motor GLOBE MOTORS 455A417-A02.

El diseño del motor muestra 4 pares de engranes que forman el conjunto de la caja reductora, el piñón está montado al eje del motor eléctrico, cuya velocidad es de 5200rpm según la tabla del fabricante. Como primer punto necesitamos calcular el valor nominal del tren, a partir del número de dientes de los engranes.

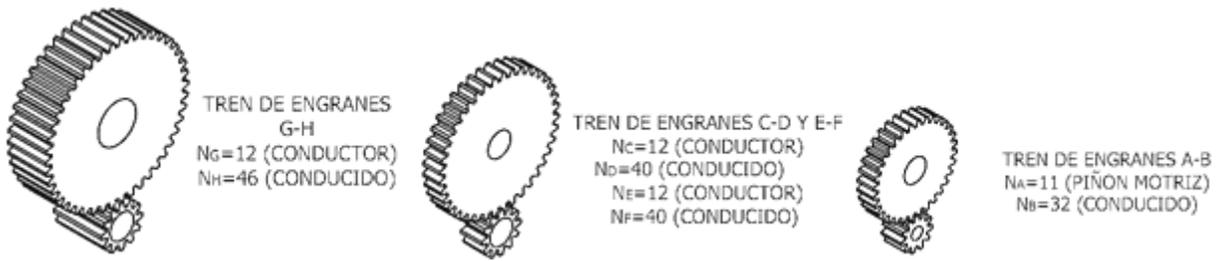


Figura 34: Características de los pares de tren de engranes del Motor: GLOBE MOTORS 455A417-A02.

$$TV = \frac{N_B * N_D * N_F * N_G}{N_A * N_C * N_E * N_H} = \frac{32 * 40 * 40 * 46}{11 * 12 * 12 * 12} = 123.90$$

En el cálculo y estudio solo se consideró la cinemática del tren de engranes, puesto que el diseño es parte del motor y a nosotros no nos interesa saber otras propiedades de diseño. Por otra parte, para cálculos de diseños ya existentes se tiene una diferencia de  $\pm 3\%$  respecto del diseño original, entonces la relación reducción sería [6]:

$$TV = 123.90 \pm 3\% = \frac{120.183}{127.617} \text{ (ec. 6)}$$

Cabe mencionar que son muy útiles los esquemas para ilustrar el arreglo de los engranes y poder rastrear como se transfiere el movimiento desde el eje de entrada del motor y como pasa a través de la caja reductora hasta el eje de salida [6]. Para conocer el sentido de giro del eje de salida de nuestro motor se muestra un esquema para cada tren de engranes:

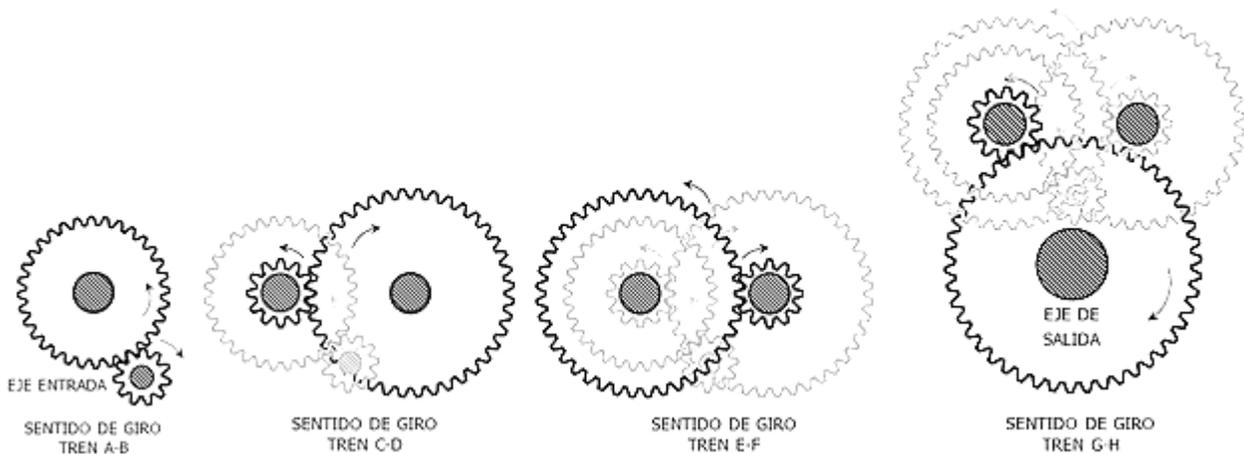


Figura 35: Sentido de giro de salida del tren de engranes del Motor GLOBE MOTORS 455A417-A02.

El cual según las dimensiones de la armadura, el valor del tren que gira en sentido de las manecillas del reloj (CW) y según la relación de reducción (127.78) que se tiene para el motor de 12 VDC a 5200 rpm en condiciones de máxima eficiencia según la tabla de especificaciones. Se puede conocer la velocidad para el eje de salida según la relación de velocidades y la velocidad del eje de entrada [6]:

$$TV = 127.78 = \frac{\text{velocidad de entrada}}{\text{velocidad de salida}} \text{ (ec. 7)}$$

Despejando la velocidad de salida puesto que se conoce la velocidad del motor que es 5200 rpm se tiene [6]:

$$velocidad\ de\ salida = \frac{5200rpm}{127.78} = 40.694\ rpm\ para\ el\ eje\ de\ salida$$

Las especificaciones del motor se pueden observar en la sección apéndices y de acuerdo a los datos que se clacularon hasta el momento, en la tabla de especificaciones del fabricante nuestro motor coincide con el motor de la serie 455A117.

Standard Part Numbers and Data							
STANDARD PART NUMBER PREFIX*	DIMENSION "A" MAX (in.)	DIMENSION "B" MAX (in.)	REDUCTION RATIO	DIRECTION OF ROTATION			
<b>Long Stack — Motors</b>							
455A112	1.375	3.956	5.90	CW			
455A113	1.375	3.956	11.50	CW			
455A114	1.375	3.956	19.66	CCW			
455A115	1.375	3.956	38.33	CCW			
455A116	1.375	3.956	65.53	CW			
455A117	1.375	3.956	127.78	CW			
455A118	1.375	3.956	218.42	CCW			
455A119	1.375	3.956	425.93	CCW			
ARMATURE WINDING DASH NO.*	VOLTAGE (VDC)	SPEED ±10% NO LOAD (rpm)	CURRENT NO LOAD (max amps)	RATED TORQUE (oz. in.)	CURRENT AT RATED TORQUE (max amps)	TORQUE CONSTANT (oz. in./amps)	RESISTANCE (ohms)
<b>Short Stack — Motors</b>							
-2	12	5,200	.29	4.0	2.0	2.95	2.25
-3	24	5,200	.14	4.0	1.0	6.00	9.00
<b>Long Stack — Motors</b>							
-2	12	5,200	.35	5.0	2.3	3.00	2.00
-3	24	5,200	.17	5.0	1.2	6.10	6.60

Figura 36: Características técnicas correspondientes al Motor GLOBE MOTORS 455A417-A02.

Motor de armadura larga.

Núm. de parte: 455A417-A02

Par máximo de este motor 300 oz.-in. (2.118 N-m) con engranajes de serie en acero sinterizado. Se puede dañar si este par se supera.

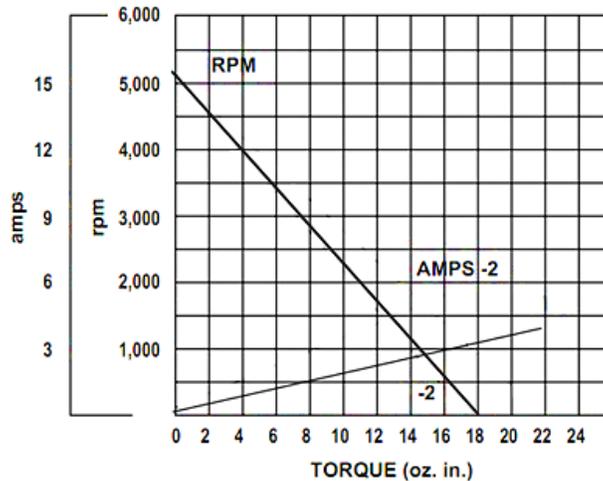


Figura 37: Rendimiento del motor GLOBE MOTORS 455A417-A02

## 2.5 Ruedas

De acuerdo a las características del robot móvil tipo diferencial se tienen dos ruedas motrices convencionales, en las cuales pasara el eje de desplazamiento, mientras que una rueda libre compuesta por dos ruedas esféricas permitirá mantener el chasis horizontalmente para que le permita girar y mantener bien equilibrada a la estructura sobre una superficie lisa.

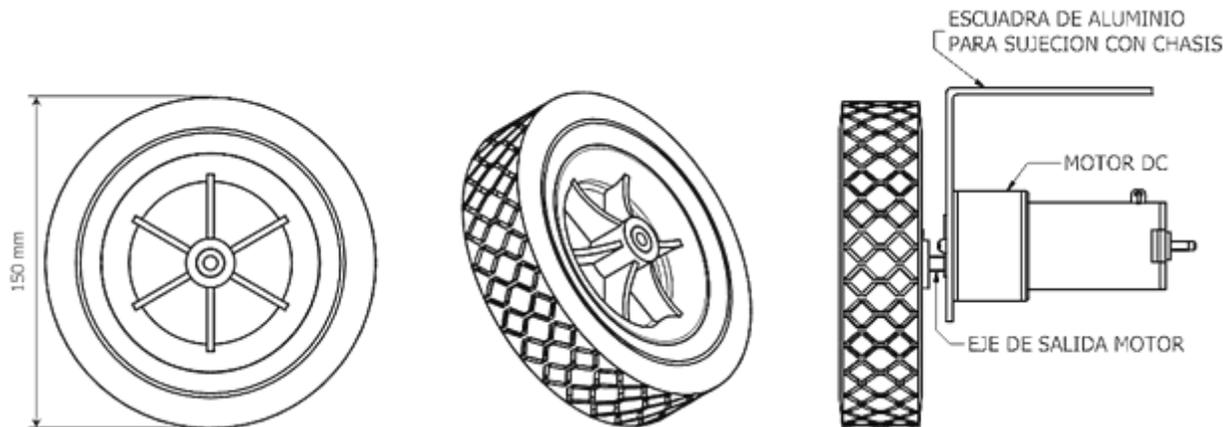


Figura 38: Características de las ruedas motrices del Robot móvil dos ruedas fijas una rueda libre.

Las dimensiones de las ruedas motrices que son de importancia conocer y teniendo en cuenta, el radio de las ruedas que es de 75mm y la velocidad angular nominal del eje de salida de nuestro motor después de la reductora que es de 40.694 rpm podemos calcular la velocidad lineal máxima de cada rueda motriz:

$$\omega_i = \omega_d = 40.694 \text{ rpm} = 0.678 \frac{\text{rev}}{\text{s}} = 4.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

El diámetro de las ruedas es:

$$\phi_r = 2 * r = 150 \text{ mm} = 15 \text{ cm}$$

Las velocidades lineales máximas correspondientes a cada rueda son:

$$v_i = v_d$$

$$v_i = \omega_i r = 4.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 7.5 \text{ cm} = 31.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 19.179 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Entonces la velocidad  $V$  máxima del robot móvil tipo diferencial es:

$$V = \frac{v_i + v_d}{2} = \frac{31.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}} + 31.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{2} = 31.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$V = \frac{\omega_i r + \omega_d r}{2} = \frac{40.694 \text{ rpm} + 40.694 \text{ rpm}}{2} = 40.694 \text{ rpm}$$

La rueda libre como su nombre lo indica debe contar con la capacidad de rodar lo más suave posible y además debe servir de pivote de manera que no dificulte la rotación del robot, por ello se implementó un par de ruedas esférica de acero incrustadas dentro de su armadura, las cuales van montadas sobre una barra de aluminio como se muestra en la figura 39.

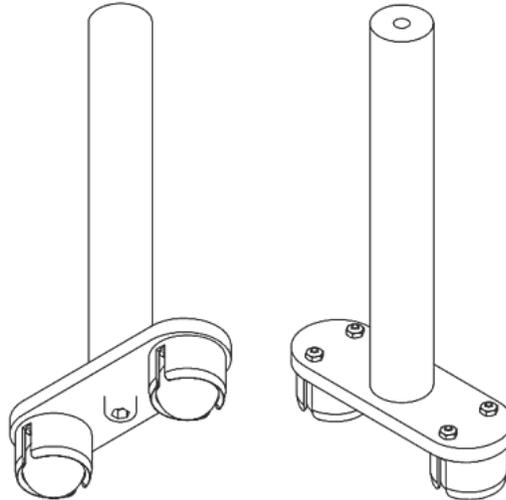


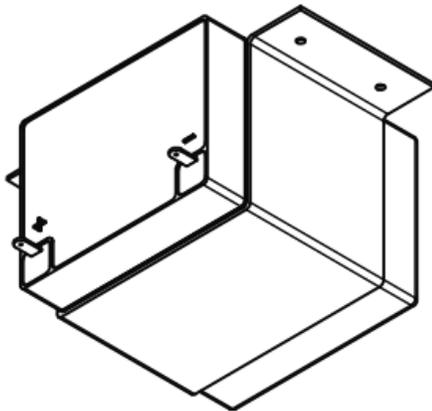
Figura 39: Configuración de la rueda libre.

## 2.6 Batería.

Como ya sabemos existen diferentes tipos de baterías en el mercado como por ejemplo baterías recargables y no recargables que proporcionan diferentes tensiones. De acuerdo a la batería que cuenta el robot móvil se tienen las características siguientes:

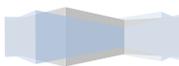
Tabla 2: Especificaciones de la batería.

<b>Batería recargable NP 4-12 12V 4Ah MARCA AG ELECTRONICA</b>		
	Altura total (con terminales)	110mm (4.33 pulgadas)
Dimensiones	Altura	100.5 (3.956 pulgadas)
	Largo	89mm (3.5 pulgadas)
	Peso	Aprox. 1.7 kg (3.75 libras)



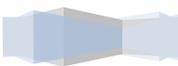
**Marca: AG Electronica**  
 (Bateria recargable)  
 Tensión nominal: 12V  
 Capacidad promedio (tasa de 12 hr) 4Ah  
 Peso. aprox 1.7 kg

Figura 40: Batería recargable marca: AG ELECTRONICA



# **CAPÍTULO III**

## **IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES AL ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL**



### 3.1 Introducción

El robot móvil debe contar con la capacidad de relacionarse con su entorno de trabajo para poder adaptar su funcionamiento de acuerdo con el estado actual del mismo, esto implica la recolección y procesamiento de información para utilizarla adecuadamente en el sistema de control. Esta información es generada por los sensores, que según la necesidad del trabajo a realizar, podrán variar tanto en número, como en tipo y complejidad. Por ello, un robot móvil rara vez va equipado con un único sensor para realizar todas sus tareas, sino que la práctica más habitual consiste en combinar varios sensores que se complementen.

Este capítulo abarca los sensores encargados de proporcionar la información del estado interno y del entorno próximo al robot para que pueda desplazarse de forma autónoma una distancia equidistante a las paredes en el interior de una habitación y a su vez le permita la detección y evasión de obstáculos de su entorno. Se utilizarán dos tipos de sensores para el robot móvil: Codificadores ópticos incrementales y Sensores infrarrojos por reflexión a objeto, los cuales proporcionarán la información respectivamente para que el robot móvil realice trayectorias estables durante su recorrido y también de la proximidad a objetos para evitar una colisión, así como sus características, su implementación y ubicación dentro del robot móvil.

### 3.2 Características de los Sensores de infrarrojos del robot móvil.

El modelo que se va a utilizar es el módulo **SHARP** (*GP2Y0A02YK0F*) *Sensor infrarrojo por reflexión a objeto*. Este tipo de dispositivo indica mediante una salida analógica, la distancia medida al objeto sobre el que refleja el haz de luz.

La mayor ventaja de estos sensores infrarrojos por reflexión a objeto es su tamaño reducido y la facilidad de utilización para una plataforma móvil, capaces de realizar una medida y proporcionar una salida que puede ser digitalizada y calibrada con base en el desempeño del sistema.

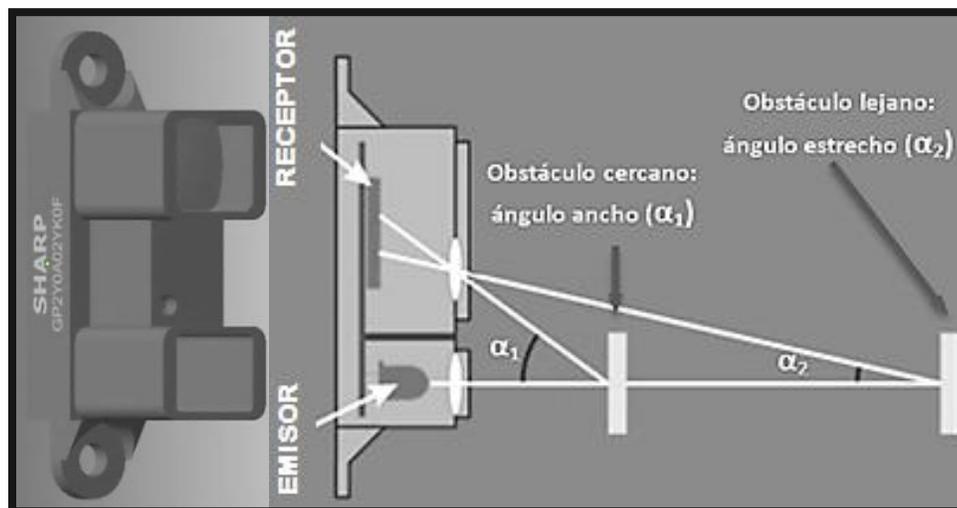


Figura 41: Esquema del funcionamiento del sensor infrarrojo SHARP (GP2Y0A02YK0F).

La tensión de salida varía de forma no lineal en un rango de detección de 20 a 150 cm cuando se detecta un objeto, tal como se aprecia en la gráfica de la figura 43, proporcionada por el fabricante. La salida está disponible de forma continua y su valor es actualizado cada 32 ms.

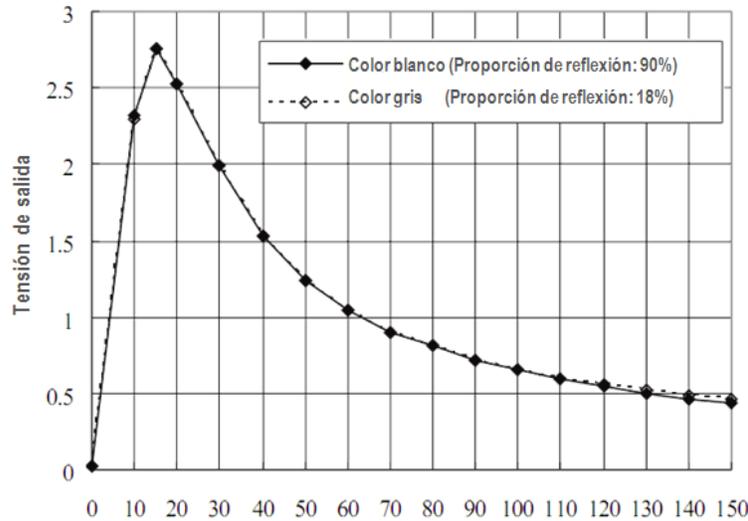


Figura 42: Gráfica del campo de trabajo del sensor SHARP (GP2Y0A02YK0F).

El dispositivo está compuesto por una combinación integrada de PSD (detector sensible a la luz infrarroja), y por un emisor IRED (LED emisor de luz infrarroja), esta luz pasa a través de una lente que concentra los rayos de luz formando un único rayo lo más concentrado posible para así mejorar la dirección de emisión del sensor, la luz viaja en línea recta hacia delante y cuando se encuentra con un obstáculo reflectante rebota y retorna con cierto ángulo de inclinación dependiendo de la distancia, la luz que retorna es concentrada por otra lente y así todos los rayos de luz inciden en un único punto del sensor de luz infrarroja que contiene en la parte receptora del dispositivo.

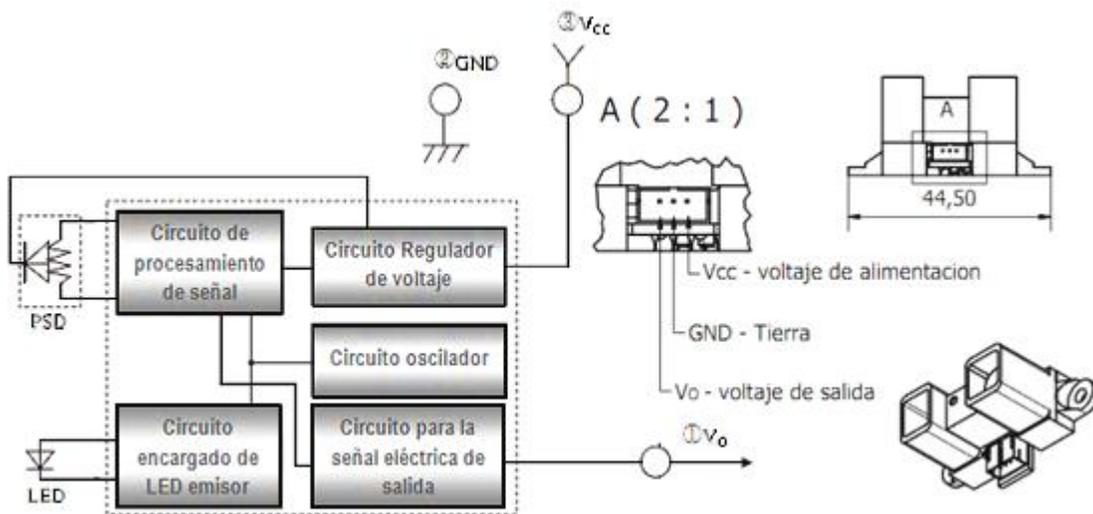


Figura 43: Diagrama de bloques del sensor infrarrojo SHARP (GP2Y0A02YK0F)

### 3.3 Características de los codificadores ópticos incrementales del robot móvil.

El modelo que se va a utilizar es el *HEDS-5505 A04* de la marca “AVAGO TECHNOLOGIES”, el cual traduce el movimiento de rotación de un eje en una salida de dos canales según el sentido en que este girando el motor, las características se muestran a continuación:

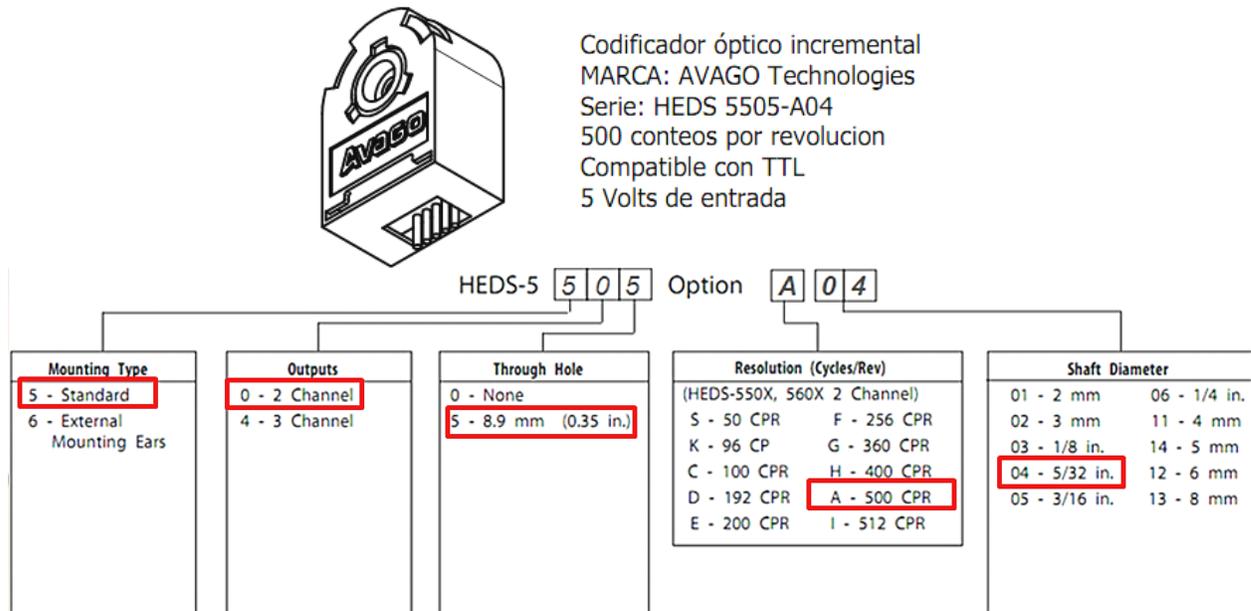


Figura 44: Codificador óptico incremental de la marca “AVAGO TECHNOLOGIES” serie HEDS-5505 A04.

- Dos canales de salida en cuadratura desfasados 90°.
- Montaje fácil y rápido, con orejas de montaje disponible y encapsulado para protección en ambientes desfavorables.
- No es necesario ajustar la señal entre canales.
- Resolución de 500 conteos por revolución del disco codificador.
- Compatible con TTL
- Fuente de alimentación de 5V y 15 mA de consumo.
- Temperatura de operación entre -40°C a 100°C
- Velocidad máxima a 30000 RPM.
- Para un diámetro de montaje al del eje del motor de 0.156 in.
- Opción de protector de silicón.

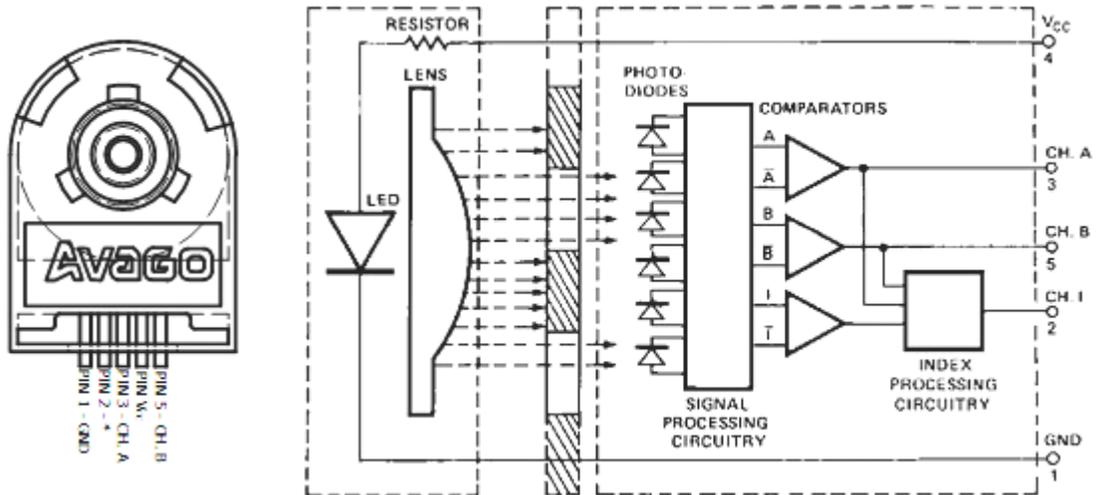


Figura 45: Diagrama de bloques del Codificador, marca "AVAGO TECHNOLOGIES" serie HEDS-5505 A04.

El disco codificador gira entre el emisor y el detector, haciendo que el haz de luz se interrumpa por el patrón de espacios y marcas en el disco. Los fotodiodos que detectan estas interrupciones se arreglan en un patrón que corresponde al radio y al diseño del disco codificador. Estos detectores también son espaciados de tal manera que un período de luz en un par de detectores corresponda a un período oscuro en el par adyacente de los detectores. Las salidas de los fotodiodos se alimentan a través del circuito de procesamiento de señal que resulta en A, A, B y B. Los comparadores al recibir estas señales producen los pulsos finales para los canales A y B. Debido a esta técnica integrada la salida digital del canal A está en cuadratura con la del canal B pero con 90 grados fuera de fase.

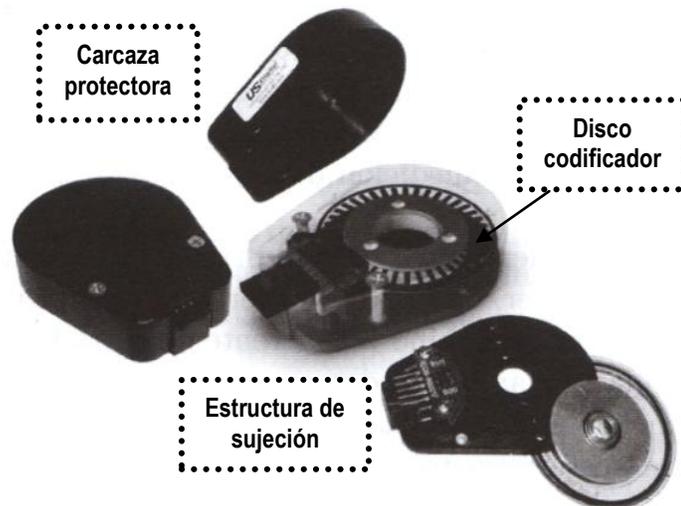


Figura 46: Componentes físicos del codificador óptico incremental.

### 3.4 Implementación de los sensores infrarrojos al robot móvil.

Una parte muy importante es la colocación de los sensores de acuerdo al objetivo de la tarea que se desea llevar a cabo. Por ello, se montara un detector de infrarrojos los cuales abarcan un campo de detección de unos  $40^\circ$  en cada lado del móvil (izquierda y derecha) para que le permita avanzar a lo largo de una pared ubicada indistintamente y a su vez le proporcionen información para el seguimiento de un muro manteniendo una distancia de separación para evitar colisionar contra ellos. También es necesario montar un detector de infrarrojos en la parte delantera del móvil con el fin de reaccionar ante un muro u obstáculo que pudiera encontrarse de frente y le permita desplazarse efectivamente con trayectorias libres y rápidas dentro la habitación.

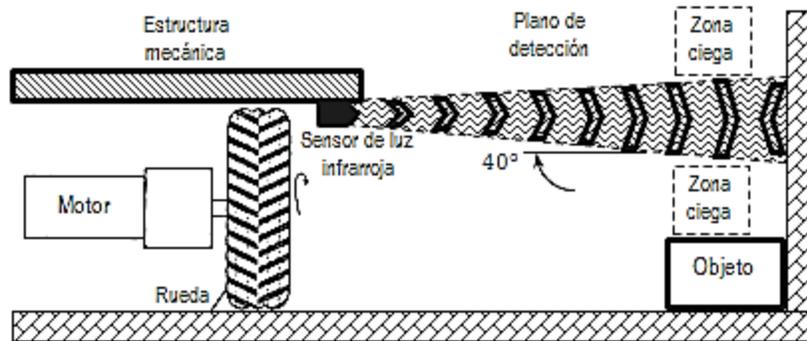


Figura 47: Campo de detección del sensor infrarrojo montado en el robot móvil.

El funcionamiento es sencillo, el emisor manda luz infrarroja dirigida hacia la pared y el elemento fotosensible del receptor capta los fotones mediante la reflexión que se produce en el muro, lo que permite obtener información variable, proporcionada por el sensor que en este caso es una señal analógica de la cual se hará la conversión a una señal de tipo lógico (código binario), con el fin de controlar el sentido de rotación de los motores cuando se acerque o se aleje del muro. Esto por medio del microcontrolador PIC 16F876A que realizara la interfaz entre los sensores y el sistema de control (control de motores), ya que este último es el encargado de la configuración y realización del programa, de acuerdo a la distancia de referencia entre el robot y el muro, para que realice las trayectorias correspondientes.

Todo ello en base de la conversión de la salida analógica del sensor a un código digital que pueda ser interpretado por el microcontrolador (PIC 16F876A) el cual trae consigo integrado un ADC, y siga las instrucciones de acuerdo al diseño del programa. Por otra parte las salidas del microcontrolador se comunicaran al circuito de control de los motores (MD22) todo ello contenido en el *Sistema de control para evasión de obstáculos del robot móvil tipo diferencial* [6].

La salida del sensor se comunicará a través de los puertos (líneas digitales) para entregar niveles TTL. Y el ADC interno del microcontrolador tomara como base un valor de 5 V para evitar realizar más circuitería, ya que el rango del sensor **SHARP** (GP2Y0A02YK0F va de 0 a 2.8 V) y la convertirá en un código digital de 8 bits será que proporcional al voltaje analógico. Usando 8 bits sabemos que el número de escalones es  $(2^n - 1)$  y por lo tanto podemos decir que habrá  $(2^8 - 1) = 255$  escalones que producirán el mismo resultado.

$$\text{Resolución (tamaño del escalón)} = \frac{\text{rango de salida analógica del sensor}}{\text{numero de bits conversor}} = \frac{5V - 0}{(2^8 - 1)} = \frac{5V}{255} = 19.6 \text{ mV}$$

Usando 8 bits del ADC del PIC para la posición del robot móvil para una zona de trabajo comprendida entre los 30 cm y 50 cm. ¿Qué tan próxima a una distancia de 40 cm y una salida analógica de 1.6 V como punto de referencia?

De acuerdo a la gráfica, el número de escalones que necesitamos será:

$$\frac{1.6V}{0.0196V} = 81.6 \approx 82$$

Como 81.6 no es un número entero del escalón se redondeara a 82 para un valor aprox. a 40cm. Después para una distancia de 30 cm con una salida analógica de 2 V del sensor según la gráfica, se tiene el número de escalones:

$$\frac{2V}{0.0196V} = 102$$

Par una resolución de acuerdo al número de escalones de la conversión necesaria para el campo de trabajo de robot móvil a una distancia de separación entre 30 a 50 cm, como se muestra en figura siguiente:

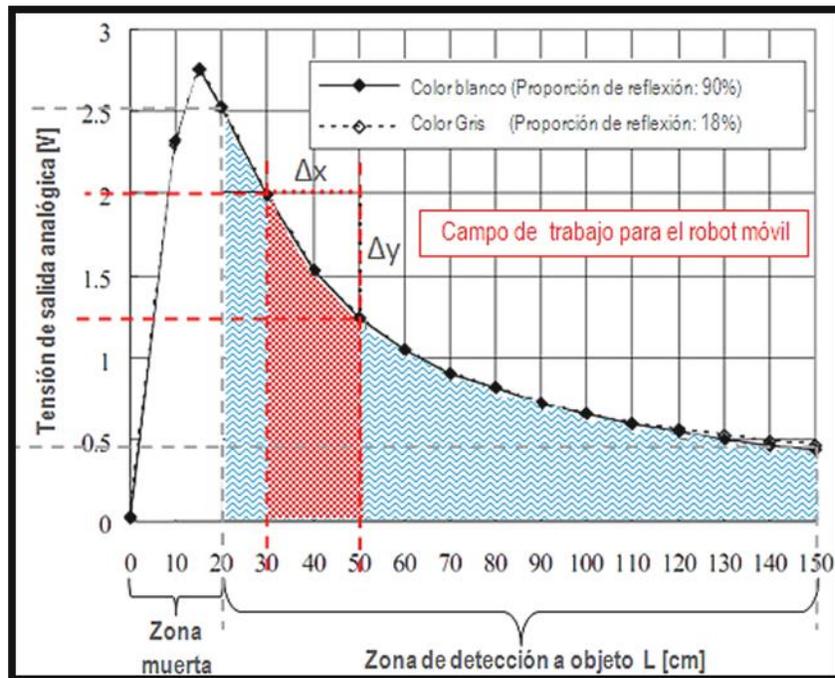


Figura 48: Campo de trabajo para el robot móvil con el sensor infrarrojo SHARP (GP2Y0A02YK0F)

En la tabla siguiente se pueden observar los distintos rangos de valores de salida del sensor comprendidos entre 30cm-1.25V a 50cm-2V para la entrada del ADC interno del PIC 16F876A, y obtener un valor digital (código binario) comprendido de 0 a 255 para un conversor de 8 bits. Esto resulta en un incremento de 0.0196 V que va desde

$0 \text{ a } (2^8 - 1) = 255$  valores binarios, que corresponden a una distancia de separación con respecto a la pared.

Tabla 3: Valores para la configuración del microcontrolador PIC 16F876A

Respuesta del sensor [V]	Núm. de escalón	Tamaño de escalón ADC [V]	Núm. Entero de escalón	Respuesta real del sensor x escalón [V]	Código binario (escalón)	Distancia [cm]	Decisión para el control	
2	102	0,019607843	102	2	01100110	31,37254902	Acercándose al muro	
1,95	99,45	0,019607843	100	1,960784314	01100100	32,84313725		
1,9	96,9	0,019607843	97	1,901960784	01100001	33,82352941		
1,85	94,35	0,019607843	95	1,862745098	01011111	34,5		
1,8	91,8	0,019607843	92	1,803921569	01011100	35,29411765		
1,75	89,25	0,019607843	90	1,764705882	01011010	36,2745098		
1,7	86,7	0,019607843	87	1,705882353	01010111	37,74509804		
1,65	84,15	0,019607843	85	1,666666667	01010101	39,21568627		
1,6	81,6	0,019607843	82	1,607843137	01010010	42,87581699		Distancia óptima
1,55	79,05	0,019607843	80	1,568627451	01010000	44,44444444		
1,5	76,5	0,019607843	77	1,509803922	01001101	45,49019608		
1,45	73,95	0,019607843	74	1,450980392	01001010	47,05882353		
1,4	71,4	0,019607843	72	1,411764706	01001000	48,10457516		
1,35	68,85	0,019607843	69	1,352941176	01000101	49,67320261		
1,3	66,3	0,019607843	67	1,31372549	01000011	50,71895425		
1,25	63,75	0,019607843	64	1,254901961	01000000	53,33333333	Alejándose del muro	

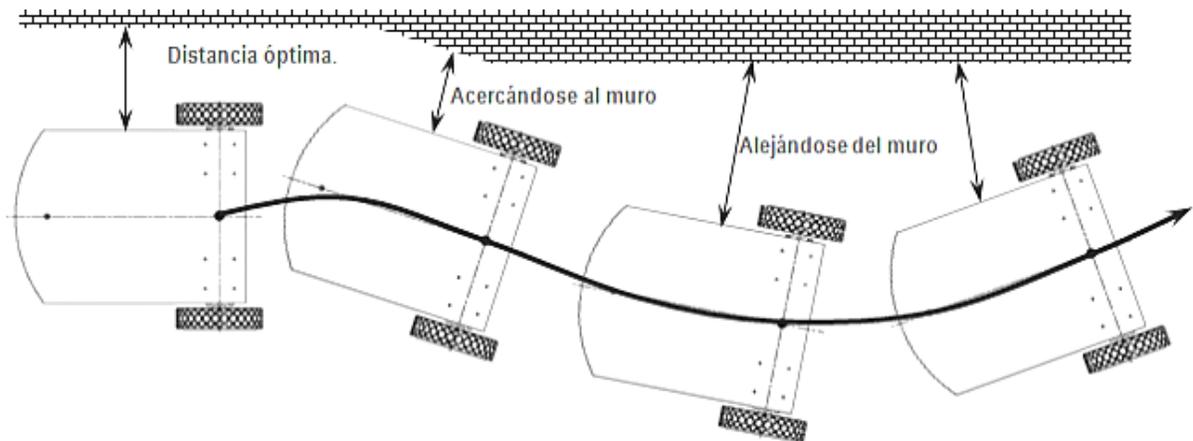
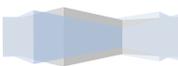


Figura 49: Desplazamiento a lo largo de las paredes sin tocarlas.

Así, el controlador debe proporcionar a la salida el equivalente binario de 8 bits del escalón para determinar el intervalo aproximado de voltajes analógicos de salida del sensor, para un resultado digital usado en la creación del programa de control de acuerdo a la distancia de trabajo del robot móvil, como se muestra en la figura 49.



### 3.5 Implementación de los Codificadores ópticos incrementales al robot móvil.

A cada motor antes de la reductora se le adaptara a su eje un codificador de posición incremental, para que traduzca el movimiento de rotación del eje, en un cambio definido en la salida del codificador (pulsos eléctricos) y permita conocer el desplazamiento de las ruedas.

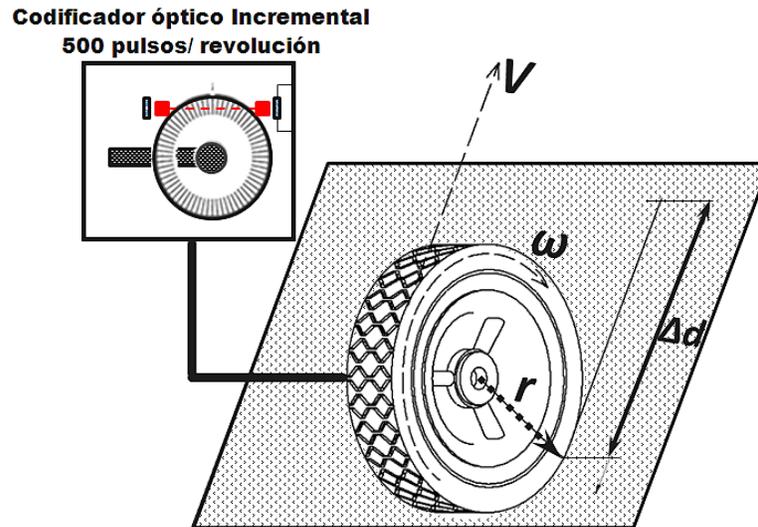


Figura 50: Codificador óptico incremental con un cambio definido en la medición de la distancia.

Conociendo algunos datos como la velocidad angular en las ruedas que es:

$$\omega_i = \omega_d = 40.694 \text{ rpm} = 0.678 \frac{\text{rev}}{\text{s}} = 4.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocidad lineal máxima a la que avanza nuestro robot móvil:

$$V = \frac{v_i + v_d}{2} = \frac{\omega_i r + \omega_d r}{2} = 31.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 19.179 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

El desplazamiento ( $d$ ) que recorre una rueda por una revolución completa en su eje de giro se tiene calculando el perímetro de la misma:

$$d_{\text{rueda}} = \emptyset * \pi = 150 \text{ mm} * \pi = 471.238 \text{ mm}$$

Se tiene que el codificador genera 500 pulsos por revolución y el motor gira a 5200 rpm antes de la reductora, de esta manera se obtiene una mejor resolución pero es necesario calcular la relación de conteo por cada revolución de la rueda. Para la salida del motor antes de la reductora se instala el Codificador incremental de 500 pulsos de detección por revolución del disco y cuya salida se conecta a la rueda del robot, se tiene que la relación de reducción es de 127.78 revoluciones del disco codificador por una revolución de la rueda. Entonces la cantidad de pulsos generados por una revolución de la rueda es:

$$(2\pi \text{ rad}) 1 \text{ revolución en la rueda} = 63890 \text{ pulsos del encoder} = \epsilon$$

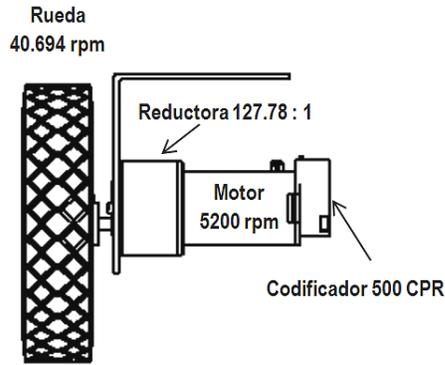


Figura 51: Codificador incremental instalado en el motor.

Para saber la distancia recorrida por cada rueda en un pulso se tiene:

$$\Delta d_{\text{pulso}} = \frac{2\pi * r}{63890 \text{ pulso}} = \frac{2\pi * 75 \text{ mm}}{63890 \text{ pulso}} = \frac{7.375 * 10^{-3} \text{ mm}}{\text{pulso}}$$

Para conocer la velocidad de procesamiento de los microcontroladores [contadores] y asegurar captar toda la información que ofrecen a la salida el codificador con 500 pulsos por vuelta en el robot con sistema motriz diferencial cuya velocidad máxima del móvil es de  $31.95 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  y con un  $r = 7.5 \text{ cm}$  de las ruedas, es preciso calcular la frecuencia mínima de muestreo para estar seguros de captar toda la información que proporcionan los 2 canales de salida del codificador. Como en cada vuelta el codificador genera **500 pulsos** antes de la reductora a una velocidad de **5200 rpm** en el eje de salida del motor y aplicando la fórmula para la frecuencia de conteo se tiene que el número de pulsos generados cada segundo es:

$$f = \text{velocidad (rpm)} * \frac{\text{CPR}}{60 \text{ s}}$$

$$f = 86.666 \frac{\text{revoluciones}}{\text{seg}} * 500 \frac{\text{pulsos}}{\text{revolucion}} = 43333.333 \text{ Hz (frecuencia de conteo)}$$

Para poder leer los dos canales del codificador el microcontrolador debe tener una frecuencia mínima de muestreo de:

$$43333 \text{ Hz} * 2 = 86666 \text{ Hz}$$

Para un tiempo aproximado entre muestras de:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{86666} = 11.538 * 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{ciclo}}$$

Es decir, para poder leer los dos canales de salida del codificador, el microcontrolador debe ser lo suficientemente rápido para realizar el conteo con un tiempo máximo aproximado entre muestras de  $11.538 * 10^{-6}$  s para leer la salida de los dos canales del codificador con 500 pulsos de detección para realizar el procesamiento requerido.

Para el diseño electrónico del circuito contador de los sensores codificadores de posición y en base a los requerimientos de procesamiento de información de los canales de salida a TTL, se implementó con un microcontrolador de uso comercial de fácil adquisición el PIC 16F627A, su cristal nos ayuda a tener el control de tiempo con la implementación externa del mismo (20 MHz), dentro de esta cabe mencionar el uso de un regulador de voltaje 7805 que nos servirá para proporcionar el voltaje de alimentación al PIC 16F627A y se implementan 2 capacitores de 22 pF para estabilizar el voltaje y evitar que el microcontrolador se pueda reiniciar.

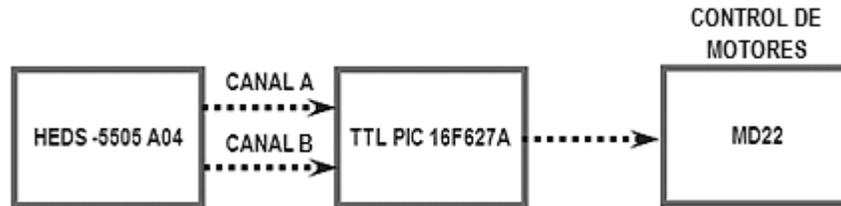


Figura 52: Interfaz del codificador óptico incremental.

Ahora cuantos pulsos genera el codificador para que el robot gire  $90^\circ$  (1.57rad) sobre la vertical, si la circunferencia que describe el robot móvil en su eje de giro medido desde el centro de las ruedas es de radio de 176.465mm.

$$\text{longitud de arco } (90^\circ) = 176.45 \text{ mm} * \frac{\pi}{2} \text{ rad} = 277.19 \text{ mm}$$

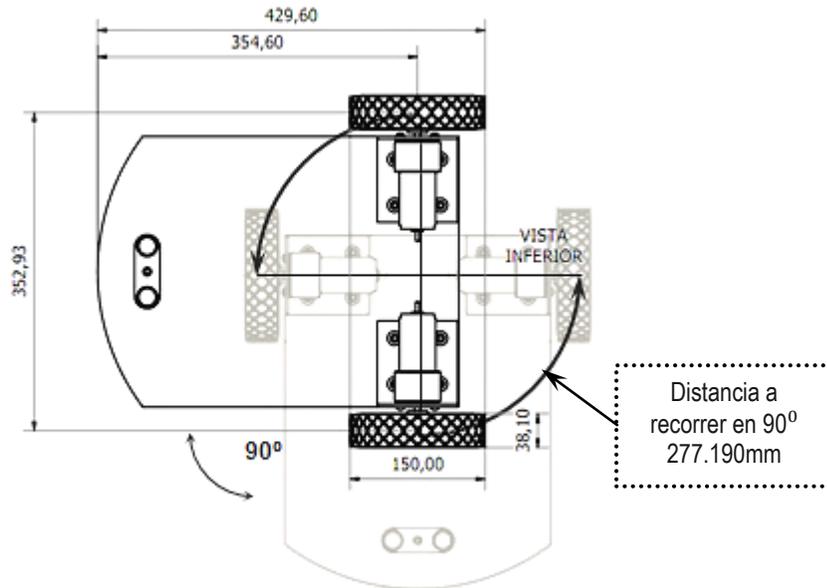


Figura 53: Esquema de la descripción del arco de giro para  $90^\circ$  del robot móvil tipo diferencial.

Y dividiendo la longitud del arco que debe recorrer entre la distancia correspondiente a un pulso, se obtiene el número de pulsos necesarios para un giro de  $90^\circ$  del robot móvil tipo diferencial:

$$\epsilon_{90^\circ} = \frac{d_{\text{arco } 90^\circ}}{\Delta d} \frac{277.19 \text{ mm}}{7.375 \times 10^{-3} \text{ mm/pulso}} = 37585.08 \text{ pulsos para } 90^\circ$$

El desplazamiento que realizan las ruedas para saber a cuantos pulsos equivale el giro del robot en  $180^\circ$ , tendríamos el doble de los correspondientes a  $90^\circ$ :

$$\epsilon_{180^\circ} = 2 * \epsilon_{90^\circ} = 2 * 37585.08 = 75170.129 \text{ pulsos}$$

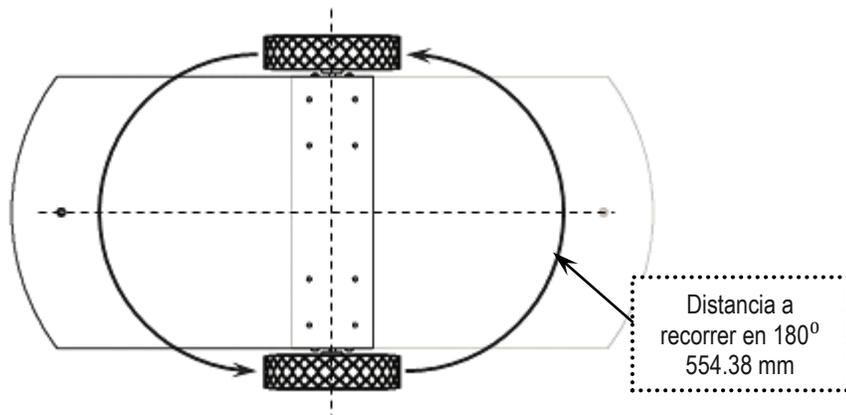


Figura 54: Esquema de la descripción del arco de giro para  $180^\circ$  del robot móvil tipo diferencial.

Ahora los pulsos generados por cada codificador para que el robot avance 60 cm en línea recta:

$$\epsilon_{d=600 \text{ mm}} = \frac{d_{600 \text{ mm}}}{\Delta d} \frac{600 \text{ mm}}{7.375 \times 10^{-3} \text{ mm/pulso}} = 81347.27 \text{ pulsos para una distancia de } 600 \text{ mm}$$

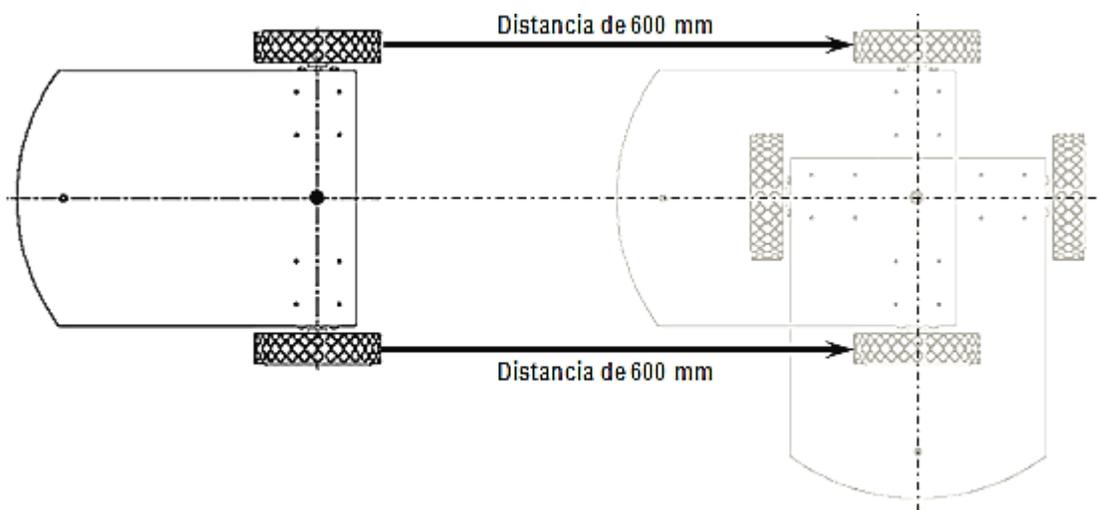


Figura 55: Esquema para el avance de una distancia de 600 mm del robot móvil.

## Pruebas.

Una vez desarrollados los cálculos para la velocidad de los motores a utilizar y seleccionar la circuitería electrónica necesaria de acuerdo a los sensores, el equipo de trabajo procedió a ensamblar todas las partes del móvil y una vez terminado procedimos a realizar las pruebas para verificar el funcionamiento correcto de la instalación como: el funcionamiento de los sensores, circuitería, estructura mecánica, tracción y en general al robot móvil tipo diferencial, con la finalidad de que este cumpla con la tarea para la cual fue diseñado.

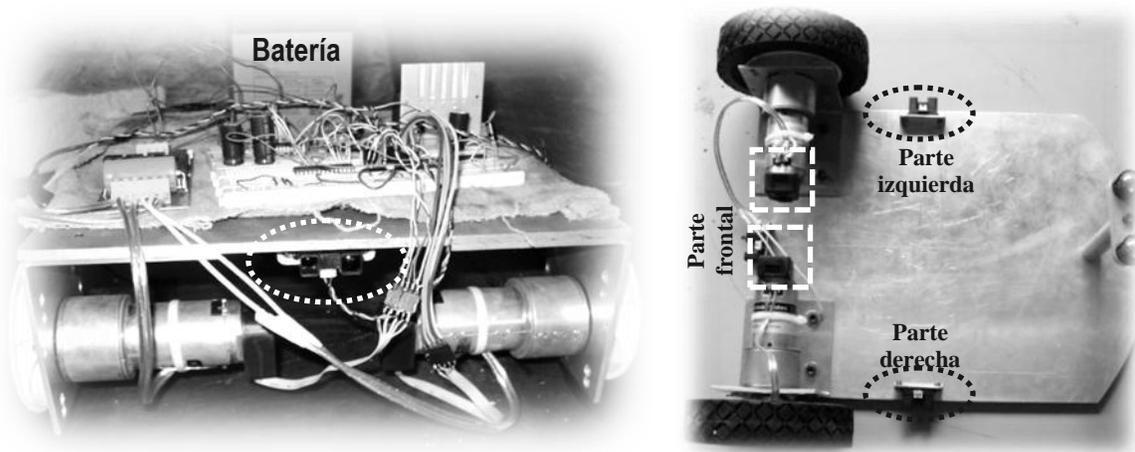


Figura 56: Conexión de los sensores al robot móvil tipo diferencial.

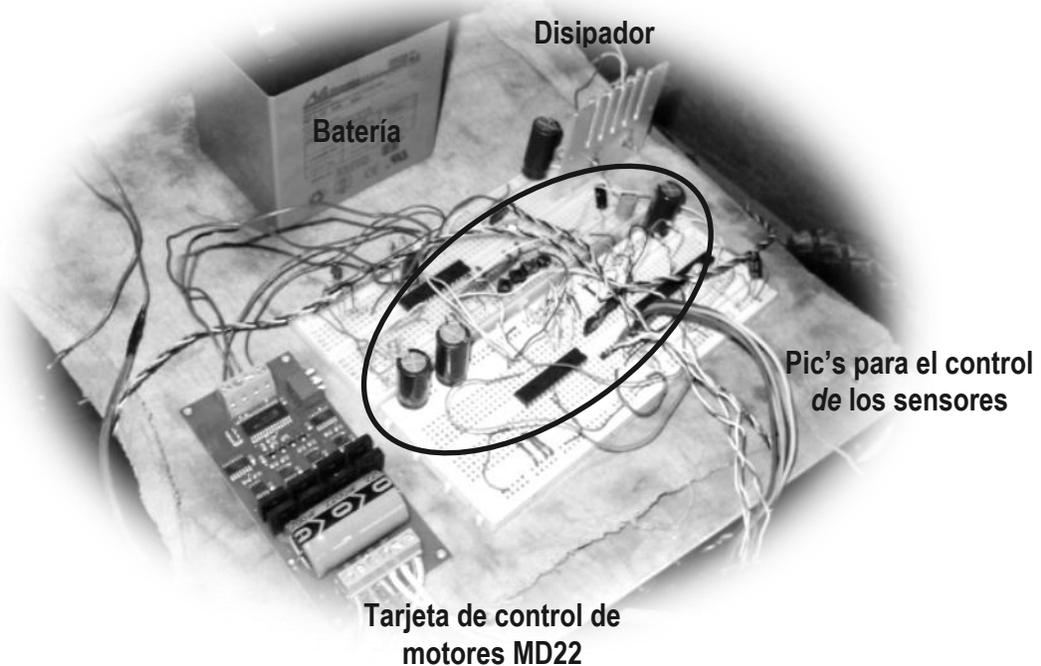


Figura 57: Diseño del sistema de potencia y control del robot móvil.

## Conclusiones, Experiencias y Trabajos futuros.

El proyecto que realizamos ha contribuido de manera muy importante para resaltar los puntos que hay que cubrir y considerar para llevar a cabo la implementación exitosa de los sensores mostrados anteriormente. A partir del trabajo realizado se puede concluir que la investigación sobre **robots móviles** educativos es más compleja de lo que pudiera parecer a simple vista en comparación con los desarrollos a nivel aficionado, ya que durante el desarrollo de este trabajo nos fuimos percatando de muchas cosas que antes ignorábamos y otras muy importantes que reflexionamos y que al final fueron tomadas en cuenta para llevar a cabo una buena implementación.

Por otra parte, el análisis e implementación de los sensores, es una primera observación al estudio de los sensores empleados en Robótica, ya que por ser muy extenso solo se mencionaron algunos más comunes en aplicaciones de robótica móvil, debido a su practicidad y bajo costo. En el caso del móvil en desarrollo su funcionamiento depende de la forma u orientación de los obstáculos que encuentre en su camino aunque pudiéramos mencionar que el resultado obtenido es aceptable. Por otra parte, es importante mencionar que se pueden realizar modificaciones para obtener diferentes ajustes de los sensores e incluso se puede añadir otro tipo de sensores para la detección de obstáculos con el fin de detectar de forma más precisa en diferentes situaciones.

Las experiencias que se obtuvieron al analizar e implementar los sensores fueron distintas entre las que podemos mencionar:

- En los robots móviles es fundamental conocer tanto el estado interno, como el estado del entorno próximo al robot.
- En la práctica lo más habitual consiste en combinar dentro del sistema sensorial varios sensores que en menor o mayor medida se complementen.
- La implementación de los sensores va de acuerdo a las características de robot móvil, el entorno y la tarea a realizar.
- En aplicaciones de robots móviles más exigentes, existe un mercado muy amplio para el empleo de otro tipo de sensores en los que el costo no es un factor importante.

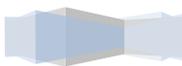
## Trabajos Futuros.

Generalmente, los robots están pensados sólo para trabajar en un entorno conocido o desconocido, para el caso de la combinación del robot móvil tipo diferencial el cual es más común para experimentos de laboratorio, existen muchos sensores más sofisticados, como cámaras de visión para la adquisición de imágenes, de los cuales se puede obtener una imagen en tiempo real, por medio de una interfaz a un computador. O la implementación de un mouse óptico para la navegación, estos solo pueden ser algunas opiniones futuras para el desarrollo del móvil.

También se puede hacer uso de programación en LabView u otro paquete informático que permita a los estudiantes interesados en el tema de estudio una primera aproximación con prácticas de laboratorio y adentrarse más en el mundo de la robótica móvil.

## Referencias

- [1] **Bolton William** MECATRÓNICA *Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*, 4a Edición, México : Alfaomega Grupo Editor, 2010. - ISBN: 978-607-7854-32-4.
- [2] **Giamarchi Frédéric** *Robots móviles, Estudio y construcción.*, Madrid : Paraninfo, 2001. - ISBN.
- [3] **Mandado Enrique, Marcos Jorge y Fernández Celso** *Automatas Programables y Sistemas de Automatización* , Barcelona, España : Marcombo, 2009. - ISBN.
- [4] **Martínez Tovar Carlos Uriel** *Tesina de especialidad "Sistema de control para evasión de obstáculos de un robot móvil tipo diferencial"*. México : [s.n.], 2011. - Vol. 70 pag.
- [5] **McCloy D** *ROBÓTICA, una introducción*, México : Grupo Noriega Editores, 1993.
- [6] **Mott Robert L** *Diseño de elementos de máquinas*, México : Pearson Educación, 2006. - Vol. 944.
- [7] **Ollero Baturone Aníbal** *ROBOTICA Manipuladores y robots móviles*, Barcelona : Alfaomega, 2007.
- [8] **Palacios Enrique y Dominguez Fernando** *Microcontrolador PIC16F84: Desarrollo de Proyectos*, México : ALFAOMEGA Grupo Editor, 2004.
- [9] **Rubio Ávila J J [y otros]** *Design of the electronic control system of an articulated robot arm*, Proceedings of the 3rd WSEAS/IASME International Conference on Educational Technologies [Libro]. - Archon, France : [s.n.], 2007. - 374-378.
- [10] **Rúbio José de Jesús y Soriano Luis Arturo** *An asymptotic stable proportional derivative control with sliding mode gravity compensation and with a high gain observer for robotic arms*, International Journal of Innovative Computing Information and Control, Vol 6, No. 11 [Libro]. - 2010. - 4513-4525.
- [11] **Rúbio José de Jesús, Torres Cesar y Aguilar Carlos** *Optimal control based in a mathematical model applied to robotic arms*, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol 7, No. 8, 2011.
- [12] **Salido Tercero Jesús** *Cibernética aplicada: Robots Educativos*, México : Alfaomega, 2010. - ISBN.
- [13] **Tocci Ronald J y Wildmer Neal S** *Sistemas Digitales: Principios y aplicaciones*, octava edición, México : PEARSON EDUCACIÓN, 2003.
- [14] **Torres Fernando y Pomares Jorge** *Robots y Sistemas sensoriales*, Madrid : Pearson Educación, 2002. - ISBN.



## **Apéndice A / Especificaciones, Circuitos electrónicos y planos del robot móvil tipo diferencial.**

Este trabajo será publicado en el libro titulado:

# ***“Selected topics of control systems using electronics”***

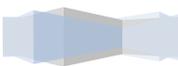
En el capítulo 5 con el título:

**Control Design for Obstacle evasion of a Differential Mobile Robot**

**AUTORES: Maricela Figueroa, José de Jesús Rubio, Samuel Acosta, Carlos Martínez.**

Editorial: Stadium Press LLC, USA.

Actualmente en redacción.



## Circuito electrónico de los sensores infrarrojos.

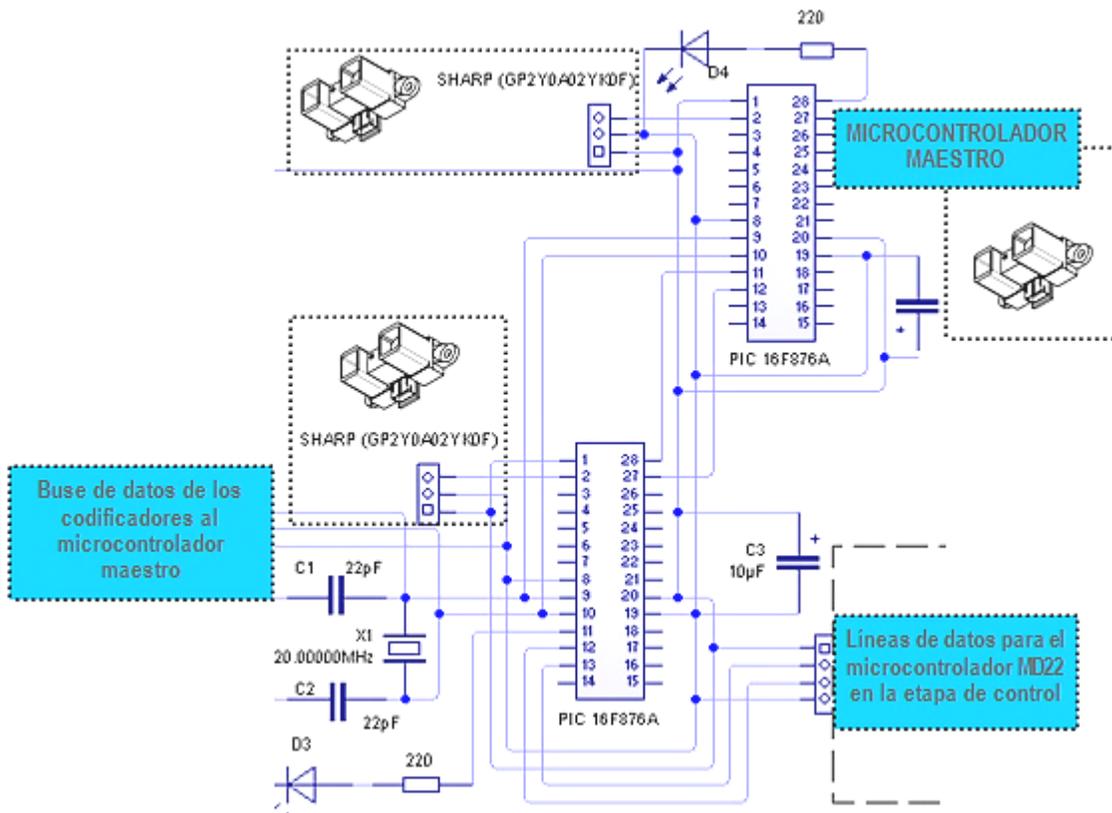


Figura 58: Circuito controlador de los sensores infrarrojos SHARP (GP2Y0A02YK0F)

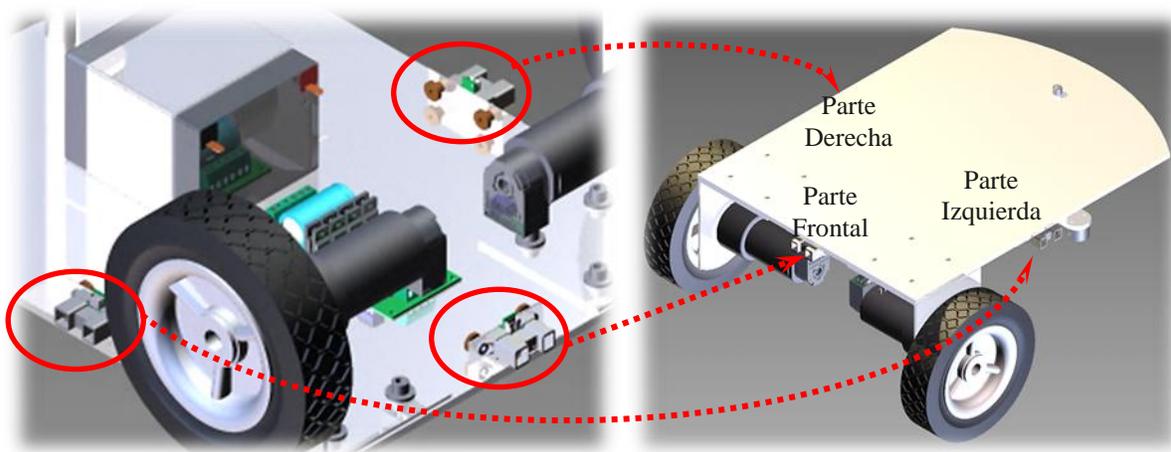


Figura 59: Ensamble del sensor infrarrojo a la estructura mecánica y su ubicación en la plataforma móvil.

## Circuito electrónico de los codificadores ópticos incrementales.

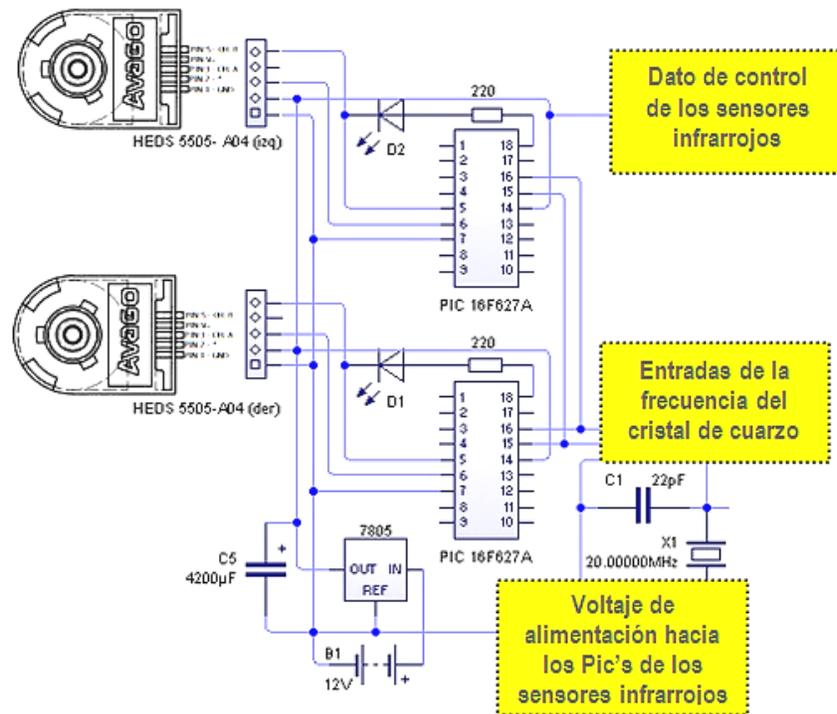


Figura 60: Diagrama del circuito electrónico de los codificadores ópticos incrementales.

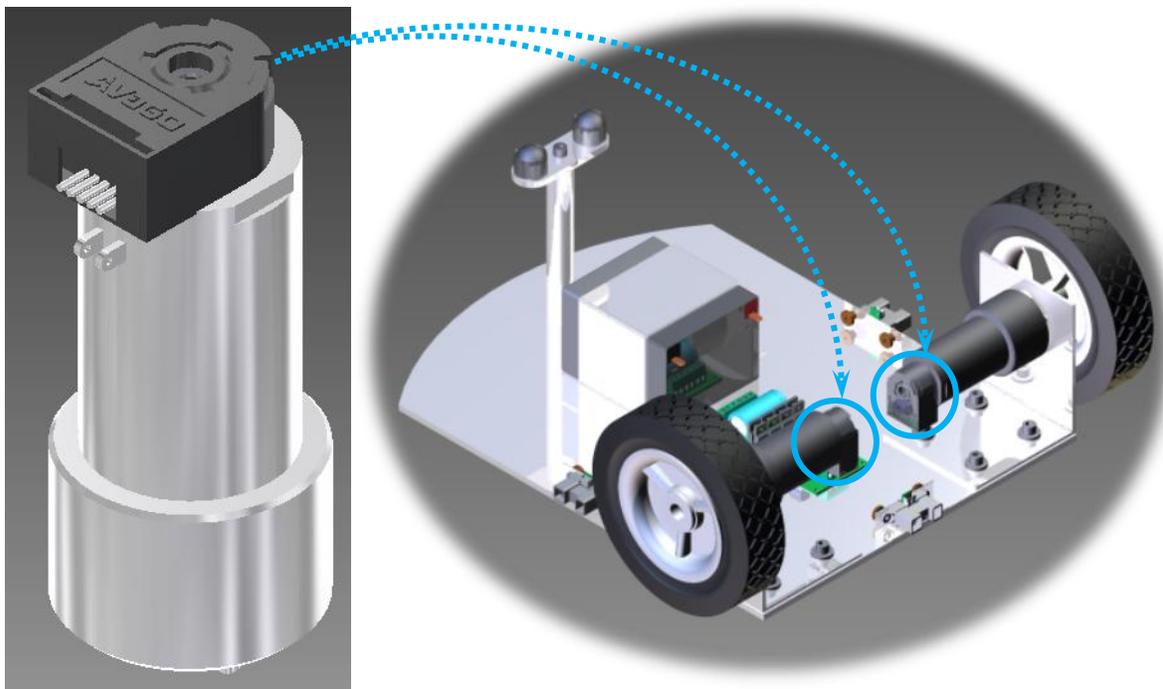


Figura 61: Ensamble del codificador óptico al motor y su ubicación en la plataforma móvil.

## Configuración del circuito electrónico de todas las etapas.

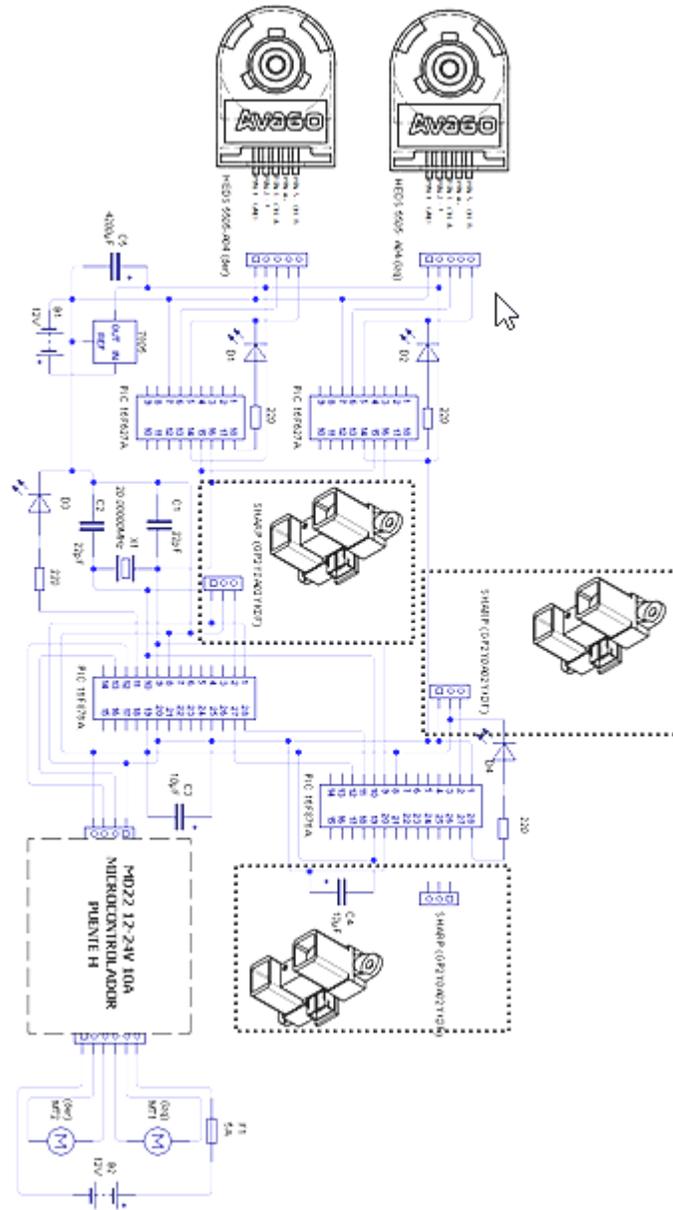
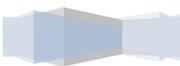


Figura 62: Diagrama electrónico de todas las etapas.





## Hoja de Especificaciones de los codificadores ópticos.

### HEDM-55xx/560x & HEDS-55xx/56xx Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders



#### Data Sheet

HEDM-55xx/560x HEDS-550x/554x, HEDS-560x/564x



#### Description

The HEDS-5500/5540, HEDS-5600/5640, HEDM-5500/5540 and HEDM-5600 are high performance, low cost, two and three channel optical incremental encoders. These encoders emphasize high reliability, high resolution, and easy assembly.

Each encoder contains a lensed LED source, an integrated circuit with detectors and output circuitry, and a codewheel which rotates between the emitter and detector IC. The outputs of the HEDS-5500/5600 and HEDM-5500/5600 are two square waves in quadrature. The HEDS-5540/5640 and HEDM-5540 also have a third channel index output in addition to the two channel quadrature. This index output is a 90 electrical degree, high true index pulse which is generated once for each full rotation of the codewheel.

The HEDS series utilizes metal codewheels, while the HEDM series utilizes a film codewheel allowing for resolutions to 1024 CPR.

These encoders may be quickly and easily mounted to a motor. For larger diameter motors, the HEDM-5600, and HEDS-5600/5640 feature external mounting ears.

The quadrature signals and the index pulse are accessed through five 0.025 inch square pins located on 0.1 inch centers.

Standard resolutions between 96 and 1024 counts per revolution are presently available. Consult local Avago sales representatives for other resolutions.

#### Features

- Two channel quadrature output with optional index pulse
- Quick and easy assembly
- No signal adjustment required
- External mounting ears available
- Low cost
- Resolutions up to 1024 counts per revolution
- Small size -40°C to 100°C operating temperature
- TTL compatible
- Single 5 V supply

#### Applications

The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and the HEDM-5500, 5540, 5600 provide motion detection at a low cost, making them ideal for high volume applications. Typical applications include printers, plotters, tape drives, positioning tables, and automatic handlers.

Note: Avago Technologies encoders are not recommended for use in safety critical applications. Eg. ABS braking systems, power steering, life support systems and critical care medical equipment. Please contact sales representative if more clarification is needed.

**ESD WARNING:** NORMAL HANDLING PRECAUTIONS SHOULD BE TAKEN TO AVOID STATIC DISCHARGE.

## Hoja de Especificaciones de los sensores infrarrojos.

**SHARP**

GP2Y0A02YK0F

# GP2Y0A02YK0F

Distance Measuring Sensor Unit  
Measuring distance: 20 to 150 cm  
Analog output type



### ■Description

GP2Y0A02YK0F is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IRED (infrared emitting diode) and signal processing circuit.

The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method.

This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

### ■Features

1. Distance measuring range : 20 to 150 cm
2. Analog output type
3. Package size : 29.5×13×21.6 mm
4. Consumption current : Typ. 33 mA
5. Supply voltage : 4.5 to 5.5 V

### ■Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2002/95/EC)

### ■Applications

1. Touch-less switch  
(Sanitary equipment, Control of illumination, etc.)
2. Sensor for energy saving  
(ATM, Copier, Vending machine, Laptop computer, LCD monitor)
3. Amusement equipment  
(Robot, Arcade game machine)

Notice: The content of data sheet is subject to change without prior notice.

In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.

1

Sheet No. : E4-A00101EN  
Date Dec.01.2006  
©SHARP Corporation

## Planos de diseño y construcción del Móvil tipo diferencial

