



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### Diseño e implementación de un robot móvil con una esfera de tracción omnidireccional.

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

**Juan Edmundo Pozo Fortunić**

**ASESOR: Gustavo Kato Ishizawa**

Lima, febrero del 2012

## RESUMEN

La utilización de robots móviles en el campo de la robótica industrial y la robótica de servicio es cada vez mayor. La mayoría de los diseños de estos robots móviles poseen la denominada tracción diferencial. Esta no permite el movimiento omnidireccional y requiere de complejos algoritmos de control para la generación de trayectorias. Por otro lado, los robots que poseen tracción omnidireccional han sido poco estudiados.

El objetivo de la tesis es diseñar e implementar un robot móvil con una esfera de tracción omnidireccional, que permita al robot realizar cambios repentinos de trayectoria sin tener que realizar giros. El robot tendrá una única esfera de tracción que será actuada por dos motores eléctricos. El control de los motores permitirá controlar el movimiento omnidireccional en el plano de desplazamiento del robot. El tamaño de la base del robot será de 10cm x 10cm y los motores eléctricos son controlados por un microcontrolador ATMEGA88PA y un controlador de motor L298 a través de señales moduladas por ancho de pulso (PWM).

Se realizarán y documentarán diferentes experimentos de generación de movimiento (lateral, diagonal y circular) y en base a estos resultados el diseño del robot será evaluado.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: ACERCA DE LOS ROBOTS MÓVILES</b>	<b>2</b>
1.1. Definición de los robots móviles.....	2
1.2. Funciones y aplicaciones .....	2
1.3. Sistema de locomoción.....	3
1.4. Marco problemático .....	4
<b>CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN OMNIDIRECCIONALES</b>	<b>5</b>
2.1. Estado del arte .....	5
2.1.1. Robots omnidireccionales.....	5
2.1.2. Control de mouse invertido.....	7
2.2. Modelo teórico.....	8
2.3. Objetivos.....	9
2.3.1. Objetivo principal.....	9
2.3.2. Objetivos específicos.....	9
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UN ROBOT CON UNA ESFERA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL</b>	<b>10</b>
3.1. Consideraciones de diseño.....	10
3.1.1. Consideraciones mecánicas.....	10
3.1.2. Consideraciones electrónicas.....	10
3.2. Diagrama de bloques.....	11
3.3. Sistema mecánico.....	11
3.3.1. Chasis.....	12
3.3.2. Rueda de tracción.....	12
3.3.3. Ruedas de apoyo.....	13
3.3.4. Motores.....	13
3.3.5. Rodillos.....	14

3.3.6. Planos.....	14
3.4. Sistema electrónico.....	16
3.4.1. Driver de motor.....	16
3.4.2. Microcontrolador.....	17
3.4.3. Acoplamiento mando-potencia.....	18
3.4.4. Alimentación y regulación de voltaje.....	19
3.4.5. Diagrama esquemático.....	20
3.5. Software de control.....	22
3.5.1. Análisis del sistema.....	22
3.5.2. Diseño de la señal de entrada adecuada.....	27
3.5.3. Relación distancia-tiempo.....	28
3.5.4. Algoritmo de control.....	28
3.5.5. Diagrama de flujo del software.....	29
<b>CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y PRUEBAS FINALES</b>	<b>30</b>
4.1. Movimiento lineal recto.....	30
4.1.1 Simulaciones.....	30
4.1.2 Experimentación.....	31
4.1.3 Observaciones.....	32
4.2 Movimiento lineal diagonal.....	32
4.2.1 Simulaciones.....	32
4.2.2 Experimentación.....	33
4.2.3 Observaciones.....	34
4.3 Movimiento circular aproximado.....	34
4.3.1 Simulaciones.....	34
4.3.2 Experimentación.....	35
4.3.3 Observaciones.....	31
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>36</b>
<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>36</b>
<b>FUENTES</b>	<b>37</b>
<b>ANEXOS</b>	

## INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, los robots se encuentran por todas partes; desde máquinas dispensadoras de gaseosas, líneas de producción, almacenes hasta inclusive en los escuadrones antibombas. Todos cumplen con funciones específicas para los cuales fueron diseñados o se adaptan a las funciones encomendadas utilizando sus diferentes subsistemas. Uno de los sistemas más importantes de los robots móviles es el sistema de locomoción, debido a que le permite desplazarse para poder interactuar con su alrededor y cumplir con sus funciones especificadas. Sin embargo, dentro de los problemas que se enfrentan los sistemas de locomoción actuales se encuentra la capacidad de cambiar de dirección de manera instantánea al desplazarse, por lo que se genera una gran deficiencia en términos de tiempo y energía.

El estudio y diseño de nuevos sistemas de locomoción (y otros sistemas) permiten a los desarrolladores de robots implementar nuevos robots que cumplan de una manera más eficiente ciertas tareas o aquellas que no se podían realizar. Entre aquellos estudios de los sistemas de locomoción basados en ruedas, encontramos un grupo específico de sistemas basados en una esfera de tracción omnidireccional que tiene la capacidad de moverse en cualquier dirección, sin la necesidad de realizar giros. Sin embargo, el principal objeto de estudio de estos autores es el control del balance del robot sobre la esfera; más no en el desplazamiento o trayectoria generada por el mismo.

El objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un controlador de movimiento de una esfera que permita desarrollar un sistema de locomoción omnidireccional sin la necesidad de controlar la estabilidad y equilibrio del móvil.

## CAPÍTULO 1:

### ACERCA DE LOS ROBOTS MÓVILES

#### 1.1. Definición de robot móvil

Dentro de los campos de la robótica, existen múltiples funciones o propósitos para los que puede estar diseñado un robot; siendo así que, dependiendo de su funcionalidad o propiedades, se pueden clasificar en diferentes tipos como: andróides, zoomórficos, poliarticulados o móviles.

Un robot móvil es un sistema autónomo capaz de atravesar un terreno con obstáculos naturales o artificiales. Su chasis está equipado con ruedas/orugas o piernas y posiblemente un sistema de manipulación de piezas de trabajo, herramientas o equipos especiales. Sus principales sistemas son locomoción, sensado, razonamiento y comunicación. [1,2]

#### 1.2. Funciones y aplicaciones

A partir de los requerimientos de las diferentes áreas de estudios, investigación o aplicaciones, y la gran interacción que posee la robótica con todas estas áreas, es factible que los robots móviles estén orientados generalmente a un área específica que cumpla ciertas funciones y aplicaciones determinadas; en las cuales su movilidad es un factor importante en el desempeño de las funciones programadas. A continuación, en la figura 1.1 se presentan múltiples aplicaciones que pueden tener los robots móviles.



(a) Automatización de laboratorios y hospitales



(b) Manejo de cargas y materiales en almacenes



(c) Sensado e inspección remota



(d) Seguridad



(e) Operaciones a la intemperie



(f) Investigación



(g) Investigación a la intemperie



(h) Para enseñanza



(i) Estaciones de trabajo

Figura 1.1: Aplicaciones de los robots móviles. Modificado de[3]

### 1.3. Sistema de locomoción

En la actualidad, los robots utilizan una variedad de técnicas para desplazarse o adquirir movimiento. En la mayoría de casos utilizan una fuente de energía eléctrica, como baterías, conectadas a uno o varios motores DC, de manera tal que el arreglo mecánico de sus partes provee los movimientos deseados por este. A estas técnicas para desplazarse se les conoce como “sistema de locomoción”.

Dentro de los principales sistemas de locomoción, encontramos aquellos basados en ruedas; los cuales poseen diferentes arreglos. Un sistema clásico es el denominado

como tracción diferencial, el cual consiste en girar el robot y luego desplazarse en esta dirección, lo que le permite navegar por todo el espacio [4]. Existen sistemas más complejos que utilizan arreglos de omniruedas [5], las cuales están compuestas por una rueda principal y múltiples rodillos en el eje perpendicular al de giro que brindan una menor pérdida por fricción y permiten la movilización en todo el plano XY [6]. Otros sistemas están basados en ruedas de oruga o piernas que brindan diferentes propiedades al robot como: desplazarse en terrenos agrietados, subir escaleras, brindar un aspecto antropomórfico, etc. [4].

#### 1.4. Marco problemático

Existe una problemática establecida en los sistemas de locomoción actuales en función de la complejidad que presentan para realizar movimientos que involucran cambios de dirección en su desplazamiento.

En la mayoría de casos, como se mencionó previamente, el cambio de dirección de desplazamiento se realiza mediante el giro del robot móvil, para luego desplazarse en la nueva dirección. Sin embargo, a pesar de que cumplen con los requerimientos de su funcionamiento, presentan una eficiencia no óptima de operación debido a la pérdida de energía y el tiempo que demora el móvil al realizar el giro correspondiente.

Debido a esto, se pretende solucionar el problema en cuestión desarrollando un sistema de locomoción que permita realizar un correcto movimiento omnidireccional que permita realizar un cambio de dirección sin la necesidad de realizar un giro para lograrlo.

## CAPÍTULO 2:

# SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN OMNIDIRECCIONALES

### 2.1. Estado del arte

Entre aquellos sistemas de locomoción basados en ruedas, encontramos un grupo específico de sistemas basados en una rueda esférica omnidireccional o también llamados *ballbot*.

#### 2.1.1. Robots omnidireccionales

Entre los ballbots destaca el original creado por Lauwers, Kantor, y Hollis [7]. *Ballbot* es un robot móvil de una sola rueda con un control de mouse invertido diseñado para trabajar de manera más fácil en ambientes de interacción con humanos.

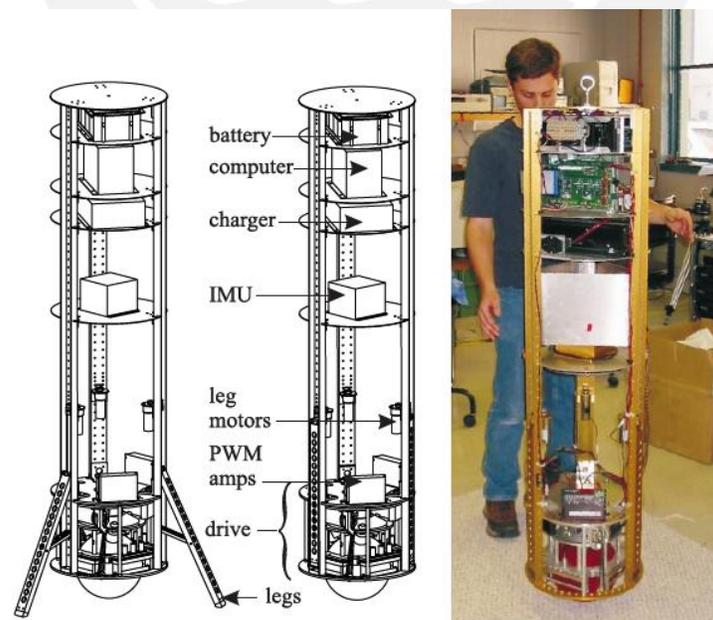
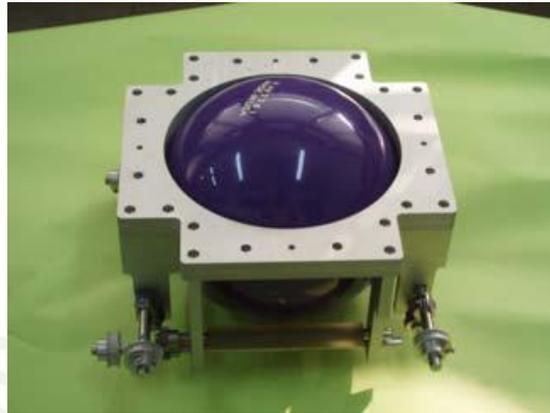


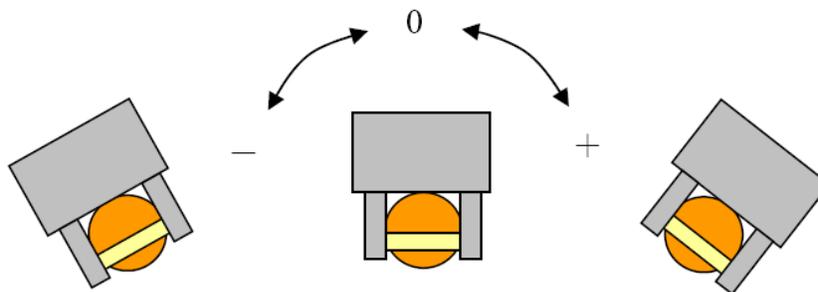
Figura 2.1: Ballbot creado por Lauwers, Kantor, y Hollis [7]

Este diseño, basado en un sistema de Péndulo invertido, el cual se apoya sobre su rueda o ruedas móviles teniendo que mantener siempre el equilibrio, supera a su predecesor de dos ruedas pues tiene la capacidad de moverse en cualquier dirección sin necesidad de girar, a lo cual llamamos desplazamiento omnidireccional. El sistema actuador sobre la bola está basado en un control de mouse invertido; que se menciona más adelante.



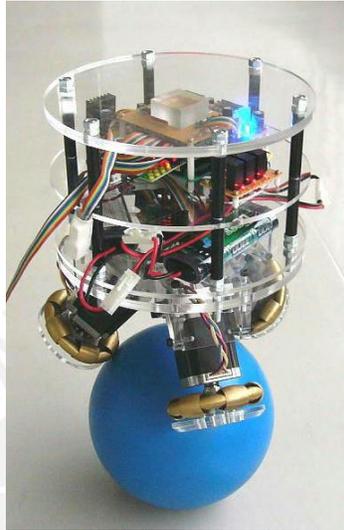
**Figura 2.2: Ballbot de Peng, Chiu , Tsai y Chou [8]**

Otros autores como Peng, Chiu , Tsai y Chou [4] también han desarrollado un robot con rueda esférica omnidireccional. Su sistema actuador es similar al mencionado previamente pues está basado en un control de mouse invertido. El principal objetivo de estudio era implementar un controlador de estabilidad y equilibrio basado en lógica difusa debido a los diferentes factores que no se pueden tener en cuenta.



**Figura 2.3: Diagrama de equilibrio del ballbot [8]**

Por otro lado, Komagai y Ochiai [5] se enfocaron en un robot que se balancea sobre una bola de boliche utilizando un sistema actuador basado en 3 motores a pasos con omniruedas; a diferencia de los mencionados previamente que utilizan un sistema de mouse invertido.



**Figura 2.4: Ballbot con 3 motores [9]**

Como se puede observar, los robots mostrados previamente tienen la necesidad o están orientados a controlar el equilibrio y balance de sí mismos sobre la esfera de tracción debido a que no poseen puntos de soporte con el piso (sin considerar los soportes de estado estático que posee el ballbot al no usarlos para su movimiento) [7].

### **2.1.2. Control de mouse invertido**

El funcionamiento del control de mouse invertido, como su nombre lo indica, se basa en el sentido inverso de un mouse de rueda; es decir, en vez de que la esfera gire los rodillos ortogonales para sensar las componentes perpendiculares del movimiento, los rodillos actúan sobre la esfera generando dos componentes dando un movimiento resultante [7].

## 2.2. Modelo teórico

Para diseñar el robot con esfera de tracción omnidireccional, primero se diseña el sistema mecánico que se acciona sobre la esfera para generar el movimiento requerido; considerando sus componentes, medidas y distribuciones.

Luego se procede al diseño del sistema electrónico que permitirá controlar los motores y por ende el sistema mecánico.

Para poder diseñar el sistema de control que se aplicará al sistema mecánico a través del sistema electrónico, se necesita establecer un modelo matemático de la parte mecánica, que permita describir el comportamiento del desplazamiento, velocidad y aceleración en función de los actuadores o motores. Para esto se debe realizar un diagrama de cuerpo libre sobre el sistema, de manera tal que se puedan relacionar las fuerzas que actúan con la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del robot móvil por lo que se deberá considerar todas las variables presentes en el sistema como torque, masa, momento de inercia, gravedad, potencia, fricción, aceleración angular, velocidad angular, radio de la rueda esférica, radio de acción del motor, etc.

Este modelo matemático nos permitirá predecir cómo se comportará el robot en función a las señales de entrada que se le apliquen, siendo en este caso el voltaje del motor.

Una vez establecido el modelo de comportamiento del sistema; podemos analizar y modelar el tipo de señal de entrada que se debe aplicar al sistema para que responda al comportamiento planteado deseado. Luego se transfieren las relaciones de entrada y salida del sistema a un algoritmo que pueda ser implementado en el sistema de control electrónico; en el cual, se deberá considerar el acondicionamiento de la señal de salida (señal digital) hacia el sistema actuador de los motores (señal analógica).

En el programa de control se deberán considerar los diferentes comportamientos o patrones de movimiento que generarán diferentes trayectorias que el robot buscará reproducir para poder analizar su omnidireccionalidad.

## 2.3. Objetivos

### 2.3.1. Objetivo principal

Diseñar e implementar un controlador de una rueda esférica omnidireccional que permite desarrollar un sistema de locomoción omnidireccional sin la necesidad de controlar la estabilidad y equilibrio del móvil.

### 2.3.2. Objetivo específicos

- 1) Diseñar e implementar sistema mecánico que permita posicionar y controlar una rueda esférica.
- 2) Diseñar e implementar un controlador electrónico que permita controlar los motores que actúan sobre la rueda esférica.
- 3) Desarrollar algoritmo generador de trayectoria en base al modelo matemático del sistema mecánico que permita al móvil desplazarse de diferentes maneras.
- 4) Evaluar el desempeño y eficiencia del sistema de locomoción omnidireccional.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE UN ROBOT CON UNA ESFERA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL

#### **3.1. Consideraciones de diseño**

Dentro de las consideraciones que se establecen en el diseño del sistema de locomoción establecido se encuentran condiciones de mecánica y electrónica, sujetas al objeto de estudio, las cuales se detallan a continuación.

##### **3.1.1. Consideraciones mecánicas**

Debido a que el objetivo es desarrollar un sistema mecánico que no necesite un control de balance y equilibrio, el sistema deberá tener puntos de apoyo con la superficie (además de la esfera de tracción) de manera que se pueda desarrollar un control enfocado en el desplazamiento.

También deberá ser un robot automata para evitar que cables o conexiones alteren sus movimientos y pequeño para utilizar menos potencia y facilitar su ensamblaje, por lo que se establece utilizar un área de superficie de 10cm x 10cm y una altura de 10cm. Además su peso no deberá exceder los 500g (incluyendo los motores) para limitar la carga que tendrán los propios motores.

##### **3.1.2. Consideraciones electrónicas**

Análogamente, el tamaño de las tarjetas electrónicas deberán ser pequeñas para ser instalables en el sistema mecánico; por lo que sus dimensiones no deberán exceder los 10cmx10cm y una altura de 1cm.

Además, deberá ser alimentado por baterías para poder desarrollar un robot móvil autónomo (como se mencionó antes) y considerar el apropiado desacople eléctrico de protección de la parte de mando y potencia del sistema.

### 3.2. Diagrama de bloques

A continuación se presenta el diagrama de bloques del sistema desarrollado; el cual está dividido en dos notorias partes: software (parte superior) y hardware (parte inferior).

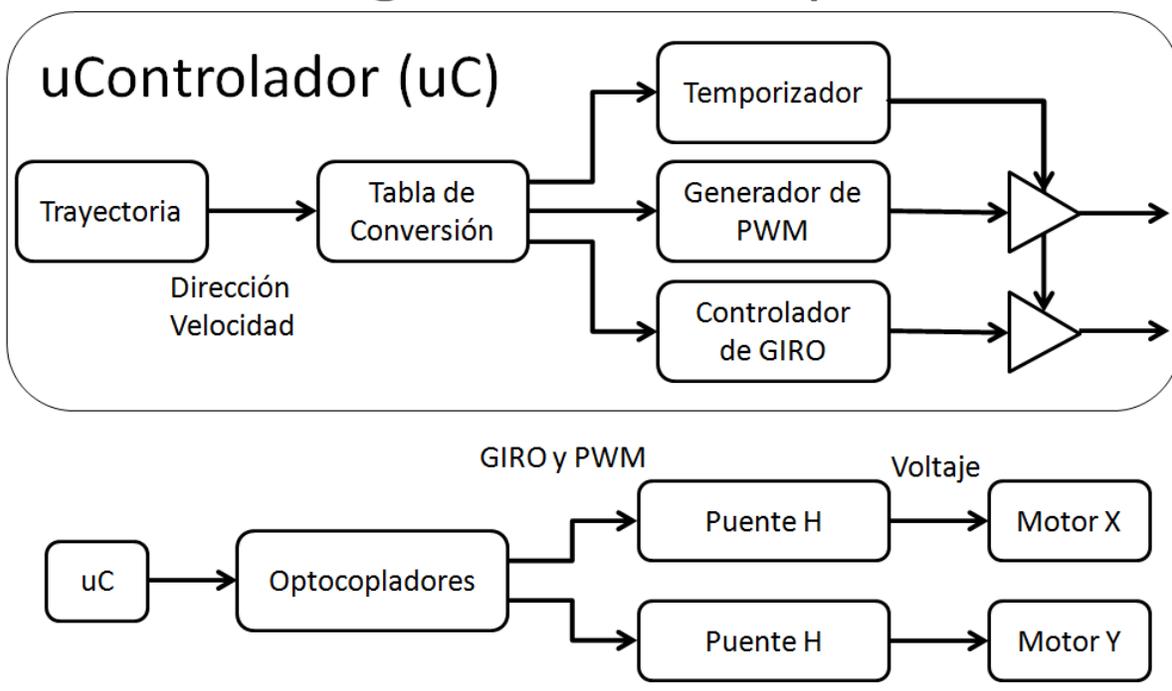


Figura 3.1: Diagrama de Bloques

### 3.3. Sistema mecánico

A continuación se detallan las partes y componentes que fueron evaluados y seleccionados para el diseño del sistema mecánico.

### 3.3.1. Chasis

Para el desarrollo del chasis se estableció una tabla con las características más importantes para su selección en base a planchas de 1 a 2mm de espesor; debido a que el móvil debe ser pequeño.

**Tabla 1.1: Tabla comparativa de materiales para el chasis.**

MATERIAL	ACRILICO	MADERA	ALUMINIO
RIGIDEZ	Alta	Baja	Alta
TENACIDAD	Baja	Baja	Alta

Siendo así que se optó por utilizar una plancha de Aluminio. El grosor de la plancha utilizada fue de 1.22mm debido a la disponibilidad del mercado.

### 3.3.2. Rueda de tracción

Dentro de las características que debe tener la esfera de tracción se encuentra el tamaño y el coeficiente de rozamiento, pues deberá generar una alta fuerza de fricción con el piso para desplazar el móvil. Se consideraron pelotas accesibles en el mercado que pudieran cumplir con las especificaciones.

**Tabla 1.2: Tabla comparativa de Pelotas.**

PELOTA	TENNIS	FRONTÓN	PLÁSTICO
TAMAÑO	PEQUEÑO	VARIABLE	PEQUEÑO
COEF. DE ROZAMIENTO	MEDIO	ALTO	BAJO

Debido al alto coeficiente de fricción y su tamaño variable (inflable) se eligió una pelota de frontón como esfera de tracción.

### 3.3.3. Ruedas de apoyo

Debido a que el móvil deberá utilizar ruedas de apoyo de manera que pueda mantener su equilibrio sin la necesidad de un control complejo, se evalúan las posibles soluciones en base a ruedas de bola o *ballcasters* (en inglés) que permitirán el movimiento omnidireccional producido por la esfera de tracción.

**Tabla 1.3: Tabla comparativa de *ballcasters*. [10]**

BALLCASTER	Con bola de 3/8" metálica	Con bola de 3/4" metálica
Longitud (")	0.750	0.876
Peso (oz)	0.14	1.05

Considerando lo expuesto previamente se seleccionó el *ballcaster* de 3/8" por ser la más pequeña y liviana.

### 3.3.4. Motores

Para la selección de los motores se tomó como requerimiento que sean motores DC para que el móvil pueda desplazarse continuamente (no se restringen como los servomotores) y sólo se controlan por la línea de alimentación (a diferencia de los motores a paso). Dentro de los seleccionados se encuentran los siguientes motores:

**Tabla 1.4: Tabla comparativa de Motores [10,11]**

Motor	DME25BA	DME33SA	RBpol62	RBpol59
Voltaje (V)	12	12	6	6
I max (A)	1.5	0.5	1.6	1.6
Torque(mN.m)	17.7	7.8	47	29.4
RPM	8000	5500	140	3000
Vel. max (m/s)	4.18	2.88	0.07	1.57

<b>Masa (g)</b>	55	55	10	10
<b>Max. Pot. (W)</b>	18	18	9.6	9.6

Considerando que es más apropiado trabajar con un menor voltaje de alimentación (al usarse baterías); menor peso posible y mayor torque manteniendo una velocidad de desplazamiento apropiada se selecciona el motor **RBpol59**.



Figura 3.2: Motor RBpol59 [10]

### 3.3.5. Rodillos

Debido a la disponibilidad del mercado y el tamaño del móvil se utilizaron rodillos de plástico de radio y altura de 8mm.

### 3.3.6. Planos

Luego de seleccionar los componentes apropiados, se diseñan los planos del sistema mecánico que permitirá controlar la esfera de tracción omnidireccional.

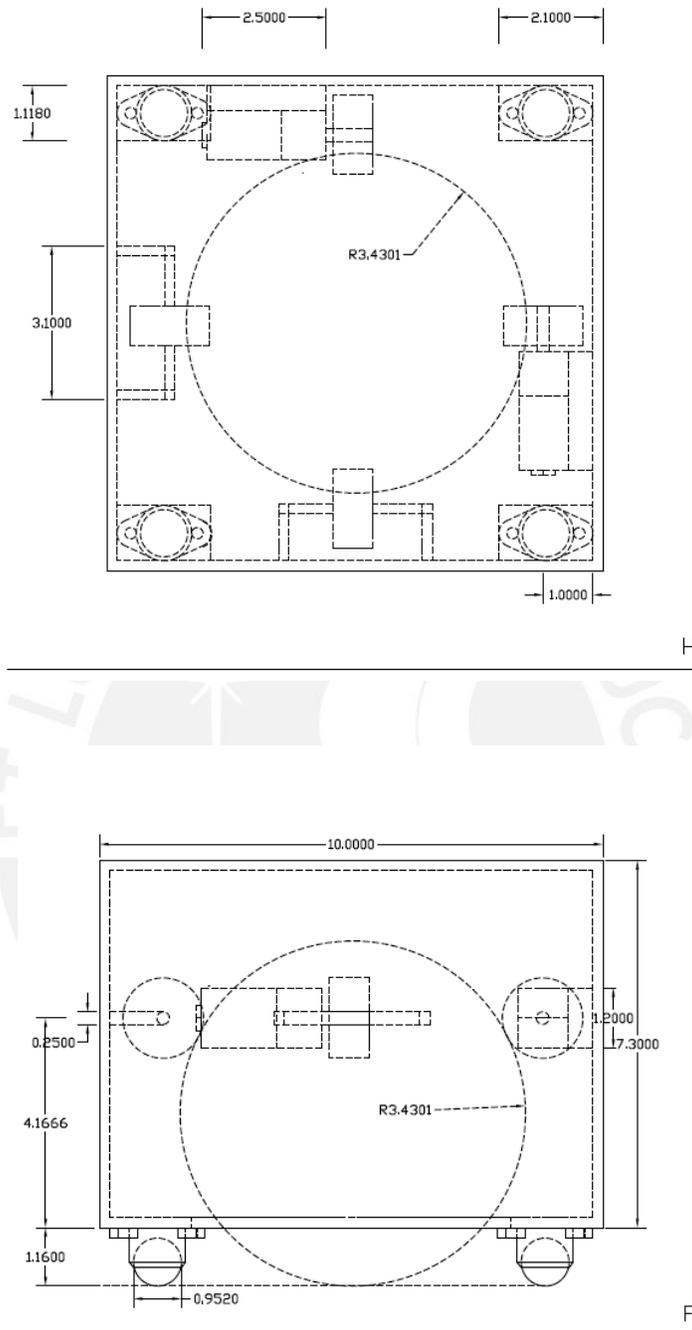


Figura 3.3: Plano del sistema mecánico (medidas en cm)

### 3.4. Sistema electrónico

A continuación se presentan los componentes electrónicos seleccionados para el controlador electrónico.

#### 3.4.1. Driver de motor

Para controlar los motores DC se establece un control mediante *puentes H* para poder controlar la velocidad y el giro de los motores; mediante un circuito integrado **L298** que contiene un driver de puente dual.

Mediante los pines de control C y D, se controla el sentido de giro del motor; mientras que el pin ENABLE (habilitador) permite controlar el paso de la señal de voltaje suministrado (0 o VSS). Utilizando la modulación por ancho de pulso (PWM) se puede utilizar el pin ENABLE para controlar el nivel de voltaje suministrado al motor, el cual corresponderá de manera lineal al ciclo de trabajo de la señal suministrada.

Además de cumplir con el funcionamiento lógico de control; el integrado deberá soportar los niveles de corriente y voltaje exigidos por el motor;. Además, sus señales de entrada controladas por el microprocesador, poseen especificaciones eléctricas que deberán cumplirse.

**Tabla 1.5: Parámetros del L298**

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
<b>Vs (Alimentación)</b>	ViH+2.5	-	46	V
<b>Vss (Alimentación lógica)</b>	4.5	5	7	V
<b>Io</b>	-	-	2	V
<b>Potencia disipada</b>	-	-	25	W
<b>ViL</b>	-0.3	-	1.5	V
<b>ViH</b>	2.3	-	Vss	V
<b>VCE sat (caída total)</b>	1.80	-	3.2	V
<b>Frec. de conmutación</b>	-	25	40	kHz

Como podemos observar, el driver L298 cumple con las exigencias del motor RBpol59 elegido previamente (ver tabla 1.5) por lo que es seleccionado para el diseño del sistema de control.

Adicionalmente, se elige el empaque PowerSO20 (montaje superficial) debido a las especificaciones y requerimientos de espacio.

Se eligió el diodo shotckey **PMEG2010ER** como protección establecida para los transistores internos del **L298**; pues cumple con los requerimientos establecidos en la hoja de fabricante del L298 (ver Anexo en CD adjunto).

### 3.4.2. Microcontrolador

Para poder realizar el sistema de control, es necesario un microcontrolador que permita desarrollar un algoritmo interno y genere señales de PWM; de manera que se pueda controlar, utilizando el driver **L298**, la velocidad y sentido de giro de los motores DC.

En base a la experiencia en trabajos previos y la disponibilidad del mercado, se optó por un microcontrolador **Atmel ATMEGA88PA**, debido a sus periféricos de PWM y bajo consumo de corriente. Sus características principales se presentan a continuación.

**Tabla 1.6: Parámetros del ATMEGA88PA**

Parámetros	Valor	Unidad
Vcc (Alimentación)	1.8 – 5.5	V
Icc (Alimentación)	9 (máx)	mA
Frec. De Operación	1-20	MHz
VoH	4.2 (min)	V
VoL	0.9 (máx)	V
Canales de PWM	6	Canales
Frecuencia de PWM	78.1 (máx)	kHz

Como podemos observar, el microprocesador **ATMEGA88PA** posee una gran cantidad de configuraciones que permiten adaptarse a las características y requerimientos del sistema; por lo que es elegido para desarrollar el sistema de control en base a las siguientes características.

Tabla 1.7: Parámetros escogidos para el ATMEGA88PA

Parámetros	Valor	Unidad
Vcc (Alimentación)	5	V
Frec. De Operación	1	MHz
Canales de PWM	2	Canales
Frecuencia de PWM	3.9	kHz

En donde la frecuencia de PWM se deriva de la elección del modo *Fast-PWM* con resolución de 8bits para la generación de PWM. Se utilizará el empaque **TQFP** en base a los requerimientos de espacio.

### 3.4.3. Acoplamiento mando-potencia

Para conectar el circuito de mando (**ATMEGA88PA**) con el driver de potencia (**L298**) de manera tal que estén desacoplados eléctricamente por requerimientos de seguridad; se utilizarán optocopladores que cumplan con los requerimientos que establecen los bloques previamente descritos.

En base a la experiencia en trabajos previos y la disponibilidad del mercado, se optó por optocopladores **LTV-826S**, cuyos parámetros cumplen con los exigidos por ambos bloques previamente descritos y se muestran a continuación.

Tabla 1.8: Parámetros del LTV-826S

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Vf	-	1.2	1.4	V
If	-	-	50	mA
VsatCEO	-	0.1	0.2	V
Ic	2.5	-	30	mA
Frec. de corte	-	80	-	kHz
Canales	-	2	-	canales

Para acoplar las entradas y salidas del optocoplador al circuito de mando y potencia, es necesario adicionar resistencias de limitación de corriente (diodo) y de *pull-up* (fototransistor) para su correcto funcionamiento.

**Tabla 1.9: Cálculo de resistencias del optocoplador**

Parámetro	Mínimo	Elegido	Máximo	Unidades
$I_f$	-	10	50	mA
$R_{in} = (V_{cc}-V_f)/I_f$	72	<b>330</b>	380	$\Omega$
$R_{out} = (V_{cc}-V_{satCEO})/I_c$	160	<b>1000</b>	1960	$\Omega$

Los 10mA seleccionados cumplen con las limitaciones en las puertos de salida del ATMEGA88PA. Por lo tanto, se seleccionan resistencias de 330  $\Omega$  para las entradas de los optocopladores y resistencias de 1k $\Omega$  para los *pull-up* de los fototransistores en la salida de los optocopladores.

#### 3.4.4. Alimentación y regulación de voltaje

Análogamente, en base a la experiencia en trabajos previos y la disponibilidad del mercado, se optó por el regulador **LM7805** para regular el voltaje de entrada a **5V** para el **ATMEGA88PA** y el **V<sub>ss</sub>** del **L298**. Los parámetros del LM7805 se muestran a continuación.

**Tabla 1.10: Parámetros del LM7805**

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
$V_{in}$	7		25	V
$V_{out}$	4.8	5	5.2	V
$I_o$	-	-	1.5	A
$V_{caida}$	-	2	-	V

Se selecciona el empaque **KTE** debido a las especificaciones de tamaño establecidas.

Debido a los nuevos requerimientos de voltaje de los reguladores y y la alimentación  $V_s$  del driver L298 para el motor; se analiza el voltaje de las baterías utilizadas para el sistema.

Tabla 1.11: Cálculo de voltaje de Baterías

Voltaje	V
Alimentación 7805	7
Vmotor	6
Vsat L298 (promedio)	2
Vss (Vsat L298 + Vmotor)	9.2
Vbaterias $\approx$ Vss	9

El voltaje de las baterías deberá ser de **9V** para el circuito de potencia y **7V** para el circuito de mando.

En base a estos nuevos requerimientos de voltaje, se evalúa la capacidad de carga y entrega de corriente de posibles baterías para alimentar los circuitos de mando y potencia (por separado) del sistema electrónico (incluidos los motores).

Tabla 1.12: Tabla comparativa entre baterías [12].

Batería	“AAA”	“PP3”
Voltaje nominal (V)	1.5	9
Capacidad (mAh)	1000	500
Numero de baterías	6	1
Voltaje Total (V)	9	9

Por lo tanto, debido a la capacidad de carga de las baterías “AAA”; se decide utilizar seis baterías AAA para alimentar el circuito de potencia y 5 baterías AAA para alimentar el circuito de mando

### 3.4.5. Diagrama esquemático

A continuación se presenta el diagrama esquemático del sistema de electrónico en base a las especificaciones y requerimientos calculados y mencionados previamente. Además de lo diseñado y seleccionado previamente, se añade un conector AVRISP al procesador para poder programarlo utilizando un programador AVRISP mkII de ATMEL.

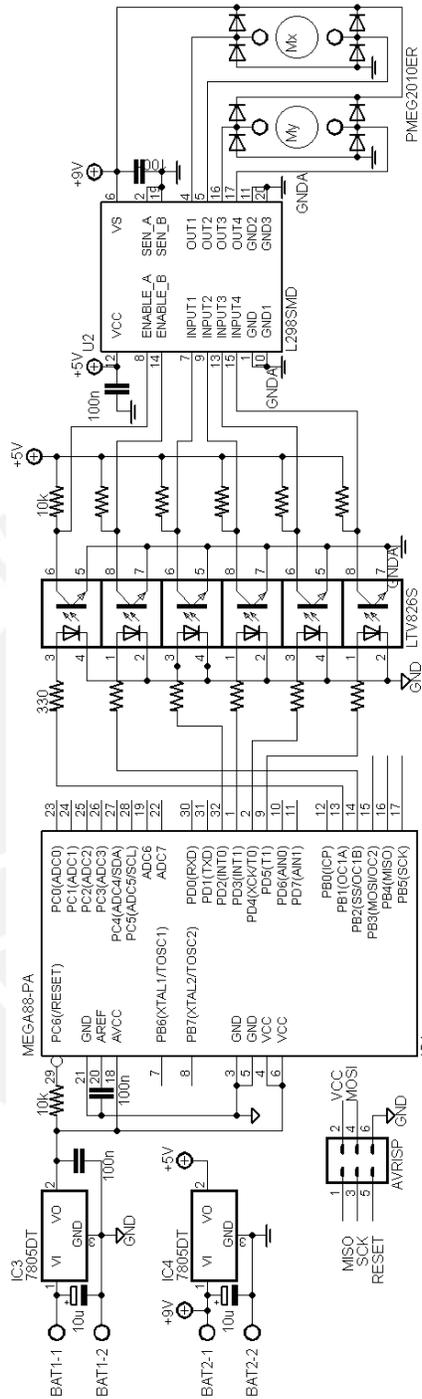


Figura 3.4: Diagrama esquemático del sistema electrónico

### 3.5. Software de control

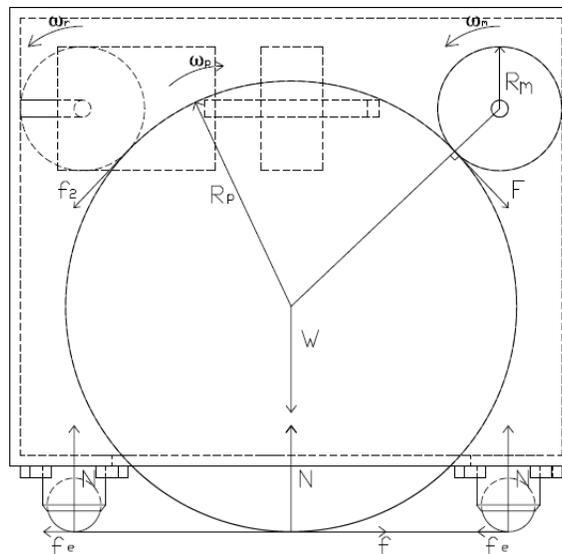
Para diseñar y desarrollar el software de control que se programará en el microprocesador, se debe realizar una análisis del diagrama de cuerpo libre sobre el sistema para poder determinar la respuesta del sistema a través del modelo espacio-espacio y función de transferencia.

#### 3.5.1. Análisis del sistema

##### Diagrama de cuerpo libre del sistema

A continuación se presenta el diagrama de cuerpo libre y la lista de variables y constantes involucradas para poder determinar la función de transferencia del accionamiento del motor y del sistema.

Como el sistema presenta simetría en sus dimensiones, podemos realizar el diagrama de cuerpo libre unidimensional para un solo motor; puesto que, al unir las componentes de movimiento de ambos motores (X e Y) se puede obtener el desplazamiento en todo el plano de superficie XY.



**Figura 3.5: Diagrama de Cuerpo Libre.**

**Tabla 2.1: Variables del sistema**

Variable	Descripción	Unidades
$x(t)$	Desplazamiento	$m$
$\dot{x}(t)$	Velocidad	$m/s$
$\ddot{x}(t)$	Aceleración	$m/s^2$
$\theta_p(t)$	Angulo de giro de esfera	$rad$
$\theta_m(t)$	Angulo de giro del motor	$rad$
$\omega_p(t)$	Velocidad angular de esfera	$rad/s$
$\omega_m(t)$	Velocidad angular del motor	$rad/s$
$\omega_r(t)$	Velocidad angular del rodillo	$rad/s$
$\dot{\omega}_p(t)$	Aceleración angular de esfera	$rad/s^2$
$\dot{\omega}_m(t)$	Aceleración angular de motor	$rad/s^2$
$\dot{\omega}_r(t)$	Aceleración angular del rodillo	$rad/s^2$
$T_p(t)$	Torque por fricción de pelota	$N.m$
$T_m(t)$	Torque del motor	$N.m$
$T_r(t)$	Torque del rodillo	$N.m$
$F(t)$	Fuerza de fricción por el piso	$N$
$Entrada \rightarrow V(t)$	Voltaje del motor	$V$
$i(t)$	Corriente del motor	$A$
$V_b(t)$	Voltaje inducido del motor	$V$

Tabla 2.2: Constantes del sistema

Constante	Descripción	Unidades
$m_t$	Masa total del robot	$kg$
$m_p$	Masa de la pelota	$kg$
$m_r$	Masa del rodillo	$kg$
$r_m$	Radio de acción del motor	$m$
$r_p$	Radio de la pelota	$m$
$r_r$	Radio del Rodillo	$m$
$I_r$	Mom. De Inercia del rodillo	$kgm^2$
$I_p$	Mom. De Inercia de Pelota	$kgm^2$
$R_a$	Resistencia de arm de motor	$\Omega$
$L_a$	Inductancia del motor	$H$
$K_t$	Constante de torque-corriente	$N.m/A$
$K_b$	Constante de voltaje-v. ang	$V.s/rad$

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para calcular la respuesta del sistema en base al análisis de diagrama de cuerpo libre realizado sobre el sistema.

### **Ecuaciones de relación angular-tangencial**

$$x = r_p \theta_p = r_m \theta_m \quad (1.1)$$

$$\dot{x} = \omega_p r_p = \omega_m r_r = r_r \omega_r \quad (1.2)$$

$$\ddot{x} = \dot{\omega}_p r_p = \dot{\omega}_m r_r = r_r \dot{\omega}_r \quad (1.3)$$

### Ecuaciones de la Segunda Ley de Newton

$$F = m_t \ddot{x} \quad (2.1)$$

$$T_r = I_r \dot{\omega}_r \quad (2.2)$$

$$T_m - T_f - 2T_r = I_p \dot{\omega}_p \quad (2.3)$$

### Ecuaciones del motor DC.

$$V = R_a i + V_b \quad (3.1)$$

$$V_b = K_b \omega_m \quad (3.2)$$

$$T_m = K_t i \quad (3.3)$$

### Modelo espacio estado y función de transferencia

A partir de las relaciones de las ecuaciones anteriores podemos obtener un modelo espacio estado del sistema; el cual se presenta en las ecuaciones (4.1) que a su vez nos permite obtener una función de transferencia en (4.2)

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_b K_t}{R_a r_r \left( \frac{2}{5} m_p r_p + m_r r_r + m_t r_p \right)} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{R_a \left( \frac{2}{5} m_p r_p + m_r r_r + m_t r_p \right)} \end{bmatrix} V \quad (4.1a)$$

$$Y = [1 \quad 0] X \quad (4.1b)$$

$$H(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{K_p}{s(s+a)} \quad (4.2a)$$

Donde:

$$K_p = \frac{K_t}{R_a \left( \frac{2}{5} m_p r_p + m_r r_r + m_t r_p \right)} \quad (4.2b)$$

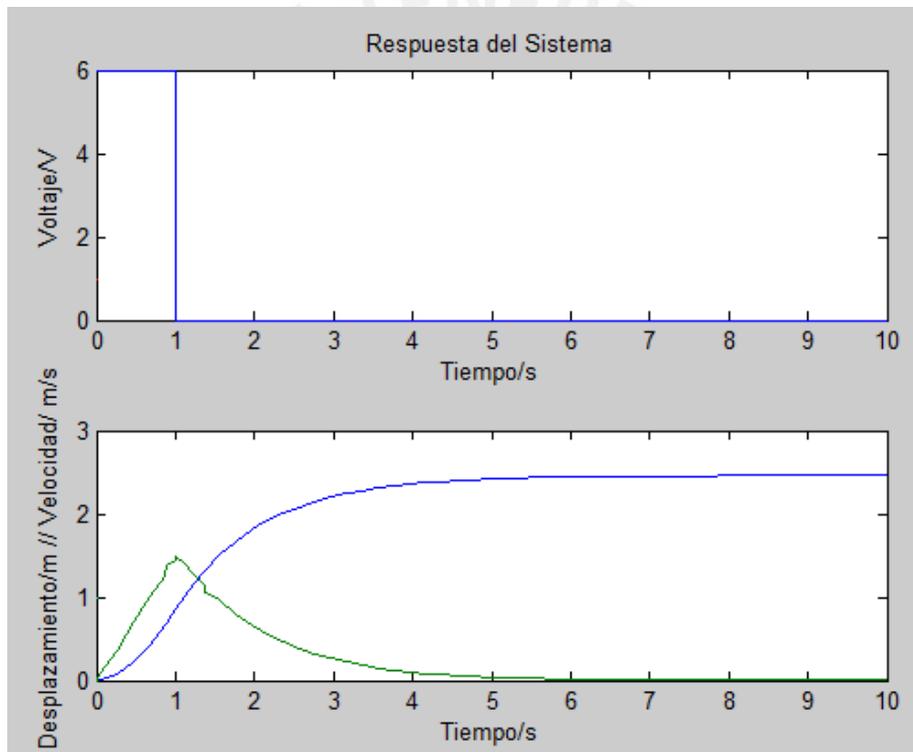
$$a = \frac{K_b K_t}{R_a r_r \left( \frac{2}{5} m_p r_p + m_r r_r + m_t r_p \right)} \quad (4.2c)$$

## Respuesta del sistema

Utilizando la función de transferencia del sistema (4.2a); se hallar la respuesta unidimensional del sistema frente a un pulso cuadrado de voltaje. Mediante la herramienta Simulink de Matlab y el análisis respectivo; se obtienen los siguientes resultados.

$$\text{Distancia recorrida} \quad D = \frac{A r_r(T)}{K_b} \quad (5.1)$$

Donde **A** y **T** son la amplitud y tiempo del pulso y **D** la distancia recorrida.



**Figura 3.6: Respuesta del sistema frente a un pulso de voltaje.**

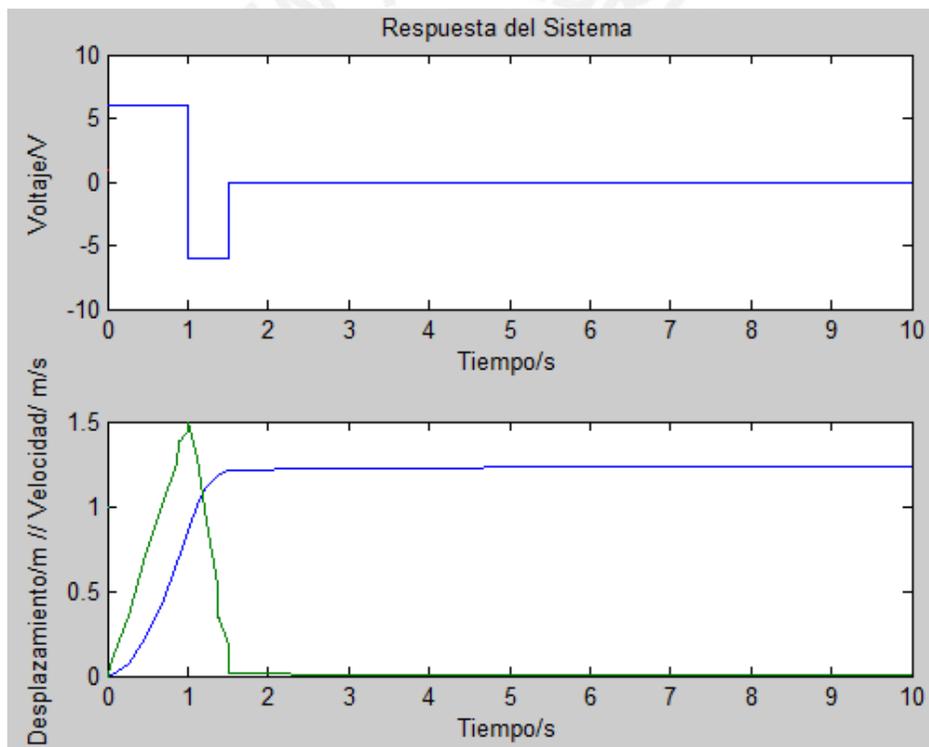
Como se puede observar en la figura 3.6, el sistema posee un tiempo de establecimiento de movimiento considerablemente largo (aprox. 10 veces el tiempo del pulso) por lo que se necesitará crear una señal de entrada adecuada que permita controlar la distancia desplazada con un tiempo de establecimiento más corto.

### 3.5.2. Diseño de la señal de entrada adecuada.

Debido a que la velocidad del móvil es dependiente directa del voltaje inducido en el motor (ver 3.2), se puede reducir la velocidad del móvil al aplicarle al motor un voltaje de polaridad inversa al anterior; de manera que el voltaje inducido se disminuye con mayor velocidad.. Utilizando la herramienta Simulink de Matlab y realizando el análisis respectivo; se obtienen los siguientes resultados.

$$\text{Distancia Recorrida} \quad D = \frac{A r_r (T - T_b)}{K_b} \quad (5.2)$$

Donde **A** , **T** y **T<sub>b</sub>** son la amplitud , tiempo del pulso y tiempo del pulso inverso (o pulso de frenado) y **D**



**Figura 3.7: Respuesta del Sistema frente a un pulso y pulso de frenado.**

Se puede observar que a pesar que disminuye la distancia recorrida para el pulso inicial, el tiempo de establecimiento del sistema disminuye considerablemente debido al pulso de frenado aplicado en la entrada.

### 3.5.3. Relación distancia-tiempo

En base a la señal creada se busca la relación entre **T** y **T<sub>b</sub>** que genere un frenado exacto; pues si **T<sub>b</sub>** es menor al valor ideal, se demorará más en establecerse y si es mayor, el robot disminuirá su desplazamiento y también se demorará más en establecerse. Realizando el análisis respectivo, se obtiene el siguiente resultado:

$$\text{Tiempo de frenado} \quad T_b = \frac{\ln(2 - e^{-aT})}{a} \quad (5.3)$$

Reemplazando (5.3) en la ecuación (5.2) de distancia recorrida se obtiene:

$$\text{Distancia recorrida} \quad D = \frac{Ar_r}{aK_b} (aT - \ln(2 - e^{-aT})) \quad (5.4)$$

Lo que nos permite despejar la ecuación en función del tiempo de pulso; dando como resultado:

$$\text{Tiempo de Pulso} \quad T = \frac{-1}{a} \ln \left( 1 - \sqrt{1 - e^{\frac{-aK_b(D)}{r_r(A)}}} \right) \quad (5.5)$$

Donde **T**, **A** y **D** son el tiempo y amplitud de pulso en directo y la distancia recorrida.

### 3.5.4. Algoritmo de control.

Utilizando las ecuaciones (5.3) y (5.5); se desarrolla una tabla que relacione **T** y **T<sub>b</sub>** con el factor **D/A** de manera tal que permita calcular los tiempos de pulso aplicados a los motores en función de la amplitud y la distancia que se desea recorrer. Una vez establecida y almacenada la tabla en el procesador, se desarrolla un algoritmo que permitirá generar los tiempos de pulso calculados para las distancias establecidas en su programación. A continuación se presenta el diagrama de flujo del algoritmo.

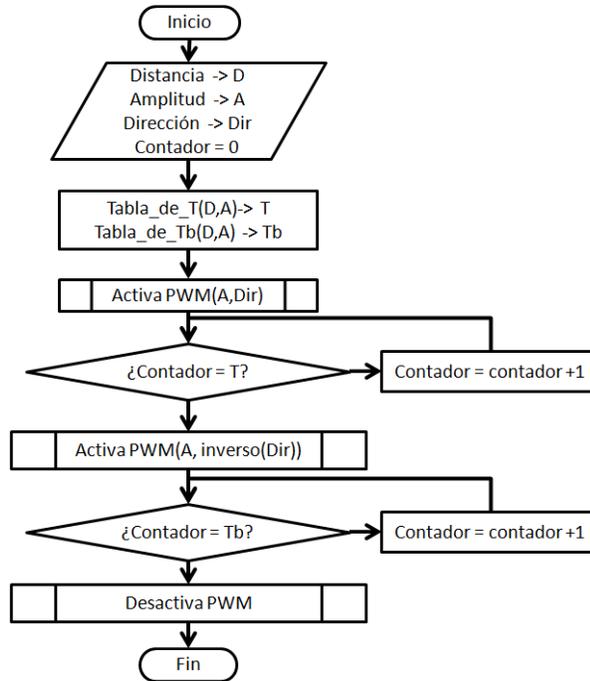


Figura 3.8: Diagrama de flujo del Algoritmo de Control

### 3.5.5. Diagrama de flujo del software

Una vez establecidos el algoritmo de control del sistema; se puede diseñar el software del microprocesador; el cual estará basado en el algoritmo previamente establecido. A continuación se presenta un ejemplo en la figura 3.9

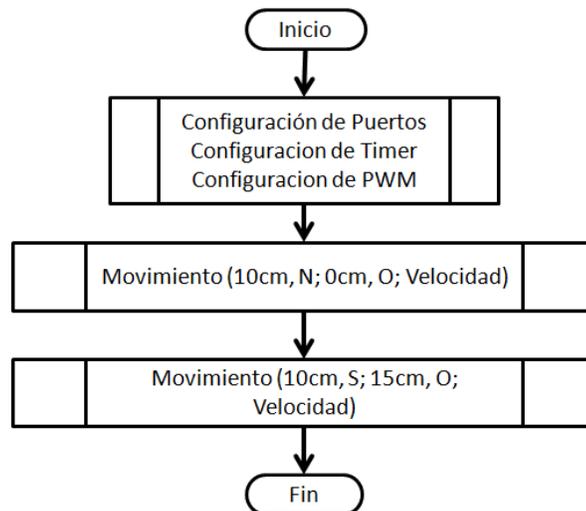


Figura 3.9: Diagrama de flujo del programa principal

## CAPÍTULO 4

### SIMULACIONES Y PRUEBAS FINALES

Dentro de las simulaciones y experimentaciones realizadas para evaluar el sistema de tracción omnidireccional; se tienen tres tipos de movimientos principales que nos permiten evaluar el desempeño del sistema en función a los objetivos establecidos.

#### 4.1. Movimiento lineal recto (M.L.R.)

El movimiento lineal recto está compuesto por el movimiento de un solo motor; generando un desplazamiento en una línea recta en el eje de coordenadas del motor activo. Está separado en cuatro casos: Norte, Sur, Este y Oeste.

##### 4.1.1. Simulaciones

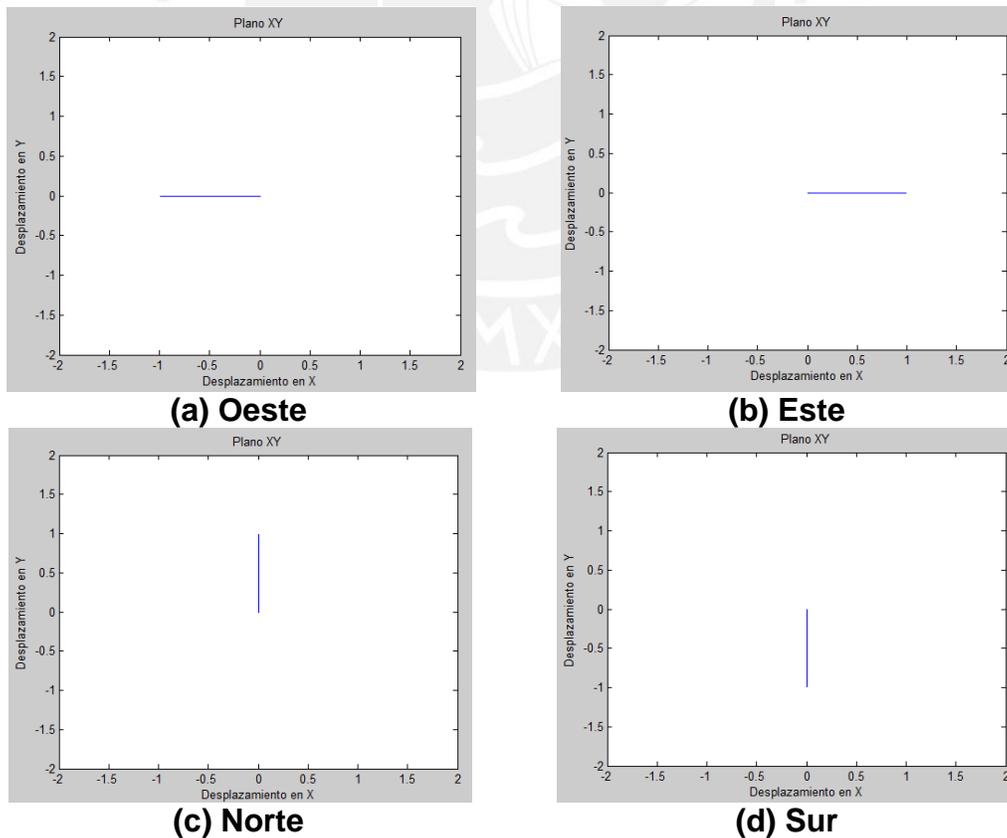


Figura 4.1: Simulaciones de M.L.R.

### 4.1.2. Experimentación

Para realizar las mediciones de experimentación se colocó el robot móvil en un plano cartesiano que permite ubicarlo en un punto de origen y en un punto final después del movimiento. Utilizando una regla, se mide la distancia recorrida correspondiente a la distancia entre ambos puntos en el plano cartesiano marcado (se utiliza como referencia el centro de robot).

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de movimiento lineal recto realizadas por el robot móvil. En la tabla 3.1 se muestra el promedio de diez repeticiones de cada trayectoria.



**Tabla 3.1: Resultados experimentales de M.L.R**

Distancia deseada (cm)	Distancia recorrida (cm)					
	4.0	$\sigma$	12.0	$\sigma$	20.0	$\sigma$
<b>Norte N</b>	3.3	0.5	10.8	4.0	19.4	6.7
<b>Sur S</b>	3.3	0.7	10.3	1.6	19.4	2.3
<b>Este E</b>	9.6	2.0	23.7	5.6	40	7.9
<b>Oeste O</b>	2.7	1.1	5.6	1.3	16	2.1

### 4.1.3. Observaciones

Se puede observar que existe una simetría promedio entre los movimientos Norte y Sur, a diferencia de los movimientos Este y Oeste, en los cuales se observa un mayor movimiento (E) y poco movimiento en el contrario (O).

Adicionalmente, se observa que a mayores distancias, en los casos de Norte y Este, existe una mayor desviación estándar, lo que nos sugiere que existe una baja precisión en ese movimiento por parte del sistema mecánico (las señales eléctricas son iguales para todos los casos).

## 4.2. Movimiento lineal diagonal (M.L.D.)

El movimiento lineal diagonal está compuesto por el movimiento de ambos motores; generando un desplazamiento en una línea recta con dirección diagonal a las coordenadas de los motores. Está separado en cuatro casos: Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste.

### 4.2.1. Simulaciones

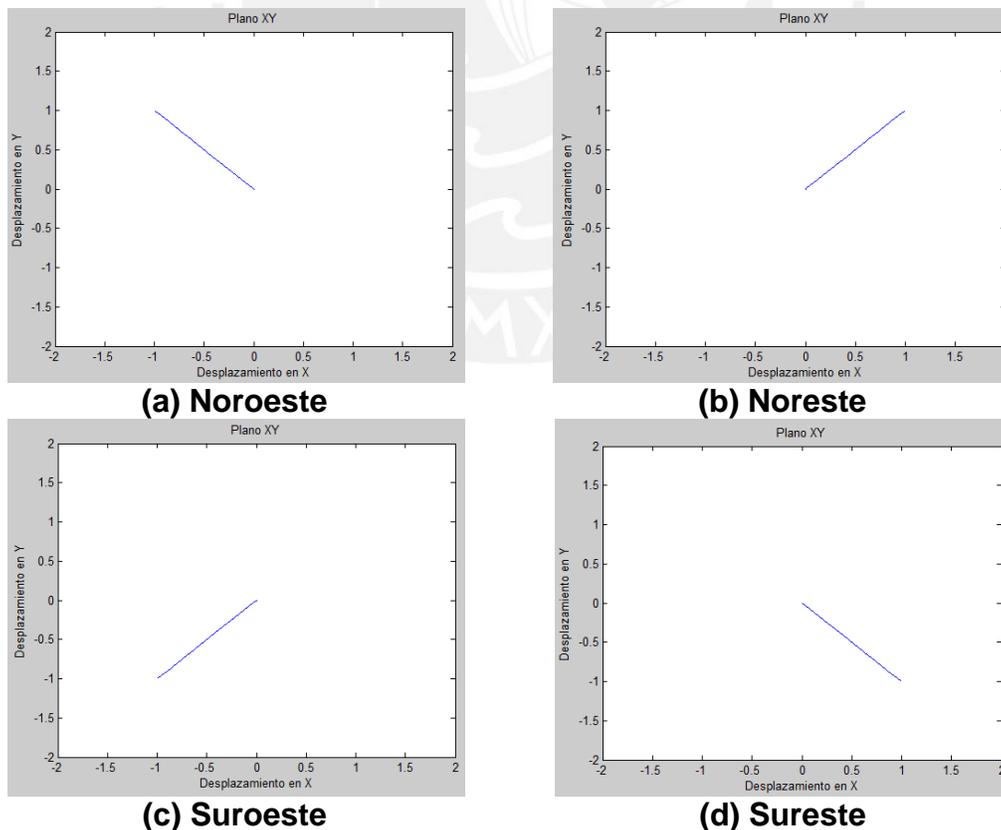
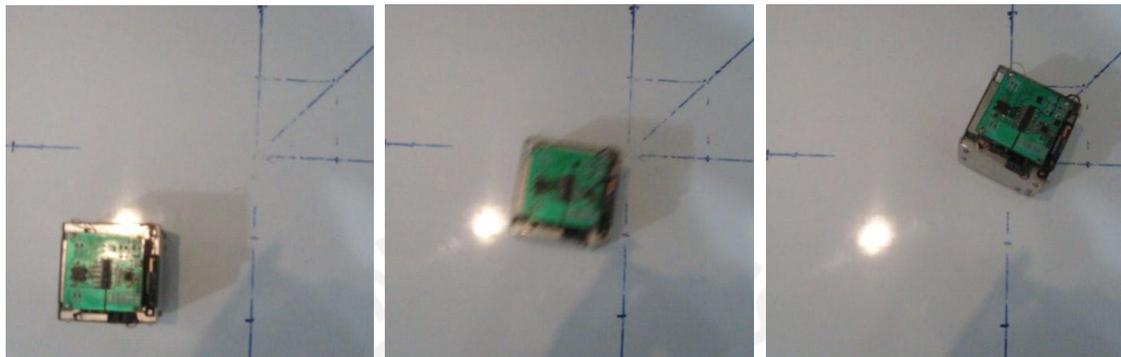


Figura 4.3: Simulaciones de M.L.D.

### 4.2.2. Experimentación

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de movimiento lineal recto realizadas por el robot móvil. En la tabla 3.2 se muestra el promedio de las 10 repeticiones de cada trayectoria.



(a) Posición Inicial (b) Estado Transitivo (c) Posición Final  
Figura 4.4: Movimiento lineal diagonal Noreste

Tabla 3.2: Resultados experimentales de M.L.D

Distancia deseada (cm)	Distancia recorrida (cm)					
	5.7	$\sigma$	17	$\sigma$	28.3	$\sigma$
Noreste NE	15.3	3.7	23.4	6.9	29.5	10.0
Sureste SE	6.9	1.3	20.5	1.5	34.1	1.6
Noroeste NO	5.6	1.3	12.1	2.3	16.6	2.0
Suroeste SO	0	0	0	0	0	0

Debido a problemas mecánicos, cuando los rodillos generan la combinación del movimiento Noroeste, la pelota queda atorada hacia arriba; dejando de mantener contacto con el piso.

### 4.2.3. Observaciones

Se puede observar que se mantiene el movimiento generado por E en los casos NE y SE, los cuales son mayores a lo programado.

Adicionalmente, se observa que se mantiene una alta desviación estándar en el caso NE (combinación de los casos con mayor desviación en MLR), mientras que las siguientes combinaciones adquieren una desviación baja a pesar de estar compuestas por un movimiento de desviación alta.

### 4.3. Movimiento circular aproximado (M.C.A.)

La trayectoria circular aproximada está compuesta por la combinación de movimientos *lineales rectos* y *lineales diagonales*; al tratar de simular un movimiento circular por aproximación de segmentos de recta tangenciales o aproximación de polígonos.

#### 4.3.1. Simulaciones

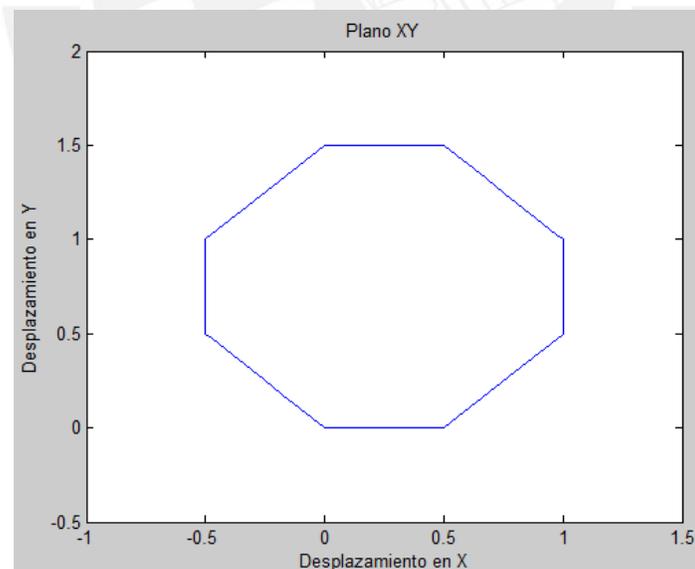
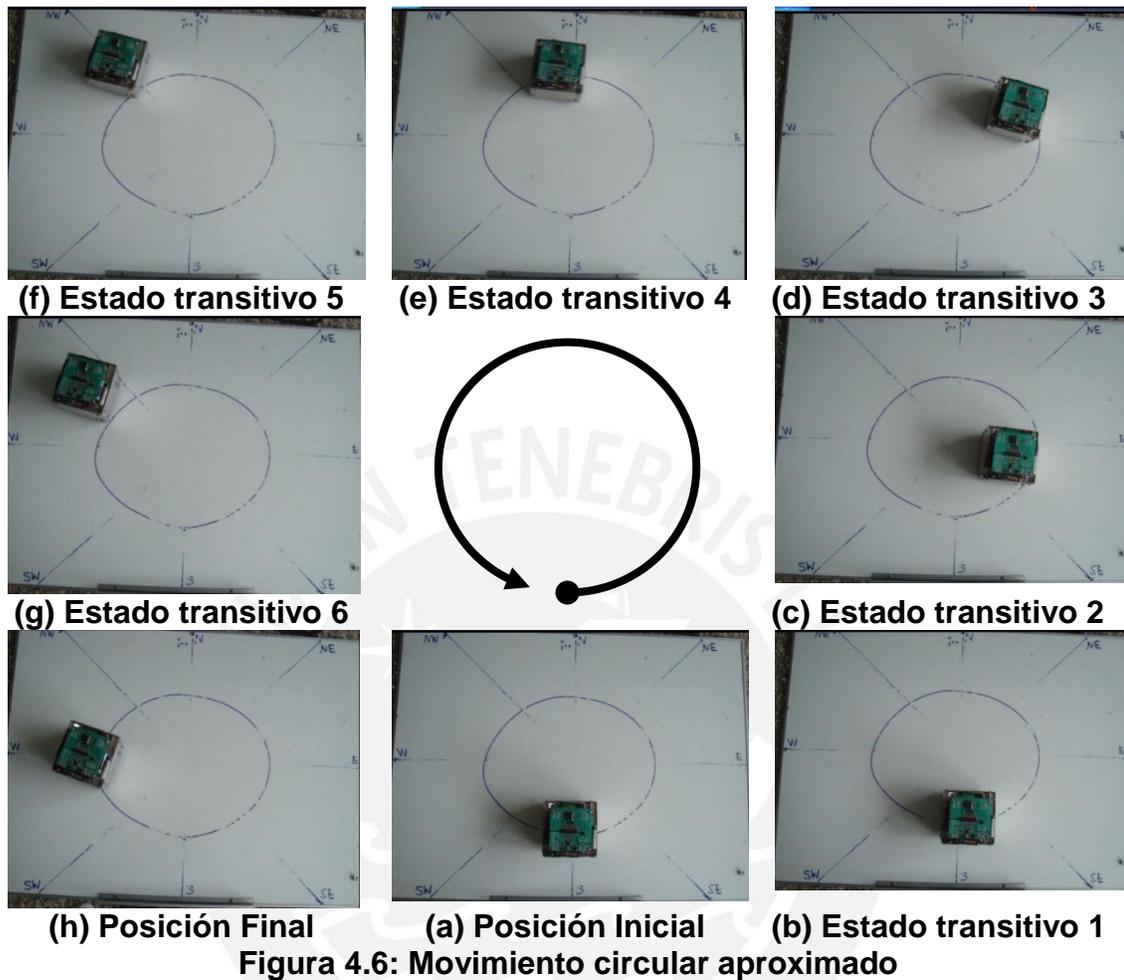


Figura 4.5: Simulación de trayectoria circular aproximada

### 4.3.2. Experimentación



A pesar de que fue programado para regresar a su posición original, el robot terminar su recorrido y queda en una posición cercana siguiendo el movimiento circular aproximado como se esperaba.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se afirma que el diseño del sistema electrónico propuesto realiza un control sobre los motores que permite limitar la distancia recorrida por el robot móvil.

En base a las diferencia entre las distancias recorridas por el robot para los casos propuestos (Norte y Sur frente a Este y Oeste) y la asimetría de los movimientos Este y Oeste, se afirma que existe un factor mecánico que afecta el movimiento del motor responsable de estos movimientos.

Respecto al movimiento lineal diagonal, se afirma que el movimiento propiciado por un motor influye en el desplazamiento que genera el otro; lo cual establece que sí existe una dependencia entre ambas dimensiones.

Además, se concluye que el robot móvil no pudo completar su trayectoria circular aproximada debido a los factores que se mencionan.

## RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda que se diseñe e implemente un nuevo sistema mecánico basado en las observaciones y conclusiones obtenidas en el presente trabajo de manera que se puedan corregir los errores mencionados en los resultados.

**FUENTES:**

[1] BARLAS, Firat.

2004 “Design of a Mars Rover Suspension Mechanism” Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica. Izmir: Izmir Institute of Technology. Departamento de Ingeniería Mecánica. [Consulta 20 de Mayo 2011]

<<http://www.scribd.com/doc/49602471/1/Definition-of-Mobile-Robot#page=15>>

[2] DUDEK, Gregory y Michael JENKIN

2000 “Computational Principles of Mobile Robotics” Cambridge: University of Cambridge.

[3] ADEPT TECHNOLOGY INC

2011 “Robot Applications” [Consulta 17 de Noviembre 2011]

<<http://www.mobilerobots.com/robotapplications.aspx>>

[4] ROBOTICS UNIVERSE

2011 “Design ideas for rolling and walking robots”. [Consulta: 11 de Marzo 2011]

<<http://www.robotoid.com/howto/exploring-robot-locomotion-systems.html>>

[5] KORNYLAK CORPORATION

2008 “Multi Directional Omniwheel Robot & Conveyor Wheels” [Consulta: 23 de Mayo 2011]

<<http://www.kornylak.com/wheels/omniwheel.html>>

[6] BLOCK, Daniel.

2005 “Diseño detallado del sistema mecánico de un robot jugador de futbol para la competencia robocup” Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica. Puebla: Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería. [Consulta: 9 de Marzo 2011]

<[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/block\\_b\\_da/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/block_b_da/capitulo4.pdf)>

[7] LAUWERS, KANTOR y HOLLIS

2006 “A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, 2006, pp. 2884-2889. [Consulta 9 de Marzo 2011]

<[http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/ballbot\\_ICRA06\\_web.pdf](http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/ballbot_ICRA06_web.pdf)>

[8] PENG, CHIU, TSAI y CHOU

2009 “Design of an Omni-directional Spherical Robot: Using Fuzzy Control” Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists (IMECS), Vol.1 [Consulta 19 de Mayo 2011]

<[http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009\\_pp168-173.pdf](http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp168-173.pdf)>

[9] KUMAGAI y OCHIAI

2010 “Development of a Robot Balanced on a Ball – First Report, Implementation of the Robot and Basic Control-” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.22, No.3. . [Consulta: 19 de Mayo 2011]

<<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002200030013.xml>>

[10] POLOLU

2011 “Catalog” [Consulta 17 de Noviembre 2011]

<<http://www.pololu.com>>

[11] NIDEC SERVO

2011 "Dc motors: Selection chart: [Consulta 32 de mayo 2011]

< [http://catalog.nidec-servo.com/digital/english/general/b\\_dme/index.html](http://catalog.nidec-servo.com/digital/english/general/b_dme/index.html) >

[12] TECHLIB

2011 "Battery Capacity" [Consulta 17 de Noviembre 2011]

<<http://www.techlib.com/reference/batteries.html>>

