 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO Y DESARROLLO DE ROBOTS CON LOCOMOCIÓN ESFERICA PARA SEGUIR TRAYECTORIAS PREESTABLECIDAS

Autor: Héctor Jaime Valencia

Ingeniería Mecatrónica

Director del trabajo de grado
Juan Sebastián Botero Valencia

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2016-2

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

La utilización de robots móviles en la industria y a nivel doméstico se encuentra en expansión, sin embargo encontramos que la utilización exclusiva de unos pocos métodos de locomoción opacan las ventajas que pueden brindar otros, es este el caso de los robots móviles esféricos, los cuales tiene diferentes sistemas para lograr el desplazamiento de la esfera con sus respectivas ventajas y desventajas; en el presente proyecto se muestra información básica de los sistemas robóticos móviles, enfocándonos en los sistemas esféricos y en especial en las ventajas que poseen cuando se deben realizar cambios de terreno o superficie de desplazamiento; se realizaron tres prototipos en acrílico y plástico, con servomotores futaba s3003 y microcontroladores PIC16F886 y Arduino Fio; estos montajes cuentan con sistemas mecatrónicos diferentes, comunicación inalámbrica con la consola de control utilizando módulos Zigbee y comunicación vía bluetooth, los cuales por su diseño, se adaptan fácilmente a algunos cambios de terreno permitiendo su utilización en la industria para realizar actividades monótonas o riesgosas de inspección y vigilancia, monitoreo en espacios reducidos y desplazamiento a pesar de algunos cambios de superficie como solida rígida, arena, pasto, liquida, etc.

Palabras clave: Zigbee, robot móvil esférico, servomotor, truncado, bluetooth, PIC, Arduino Fio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco ante todo a Dios, creador de todas las cosas, por brindarme la oportunidad de participar en este valioso proceso educativo, a mi familia, parte vital y soporte que me impulsa a buscar crecimiento constante, a todos y cada uno de mis Profesores por sus valiosos aportes, paciencia, tolerancia, dedicación, empeño y en especial por no darse por vencidos a pesar de lo arduo de su labor, a mi asesor de proyecto de grado y profesor de Robótica, Juan Sebastián Botero Valencia, por la confianza, apoyo, guía, orientación, aportes académicos y paciencia que desde el principio del proceso ha demostrado, tanto en la creación de los prototipos como en la elaboración del informe final y al Instituto Tecnológico Metropolitano por su enfoque tecnológico y social, por procurar formar profesionales con altos niveles de calidad y por permanecer fiel a su lema de “Modelo de calidad, para una ciudad innovadora y competitiva”

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

IDU Unidad Motriz Interna

V Voltaje

mAh Mili Amperios Hora

USB Bus serial universal

PWM Modulación por ancho de pulso

MHz Mega Hertz

ms Milisegundos

Hz Hertz

gr. Gramos

mm. Milímetros

N.m Newton por metro

Kg-cm Kilogramo por centímetro

seg. Segundo

cm. Centímetro

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	
2.	MARCO TEÓRICO.....	
2.1	Robots Móviles que utilizan Ruedas.....	
2.2	Robots Móviles Esféricos.....	
2.3	Ventajas de los Robots Móviles Esféricos.....	
3.	METODOLOGÍA.....	
3.1	Robot Esférico Pendular.....	
3.2	Robot Esférico Tipo Bola De Hámster.....	
3.3	Robot Esférico Tipo Pendular Modificado.....	
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	
4.1	Robot móvil esférico pendular.....	
4.2	Trayectoria robot móvil esférico pendular.....	
4.3	Robot móvil esférico Bola de Hámster.....	
4.4	Trayectoria robot móvil esférico Bola de Hámster.....	
4.5	Robot móvil esférico tipo Pendular Modificado.....	
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	
	REFERENCIAS.....	
	APÉNDICE.....	
	Apéndice A.....	
	Apéndice B.....	
	Apéndice C.....	

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Existen muchos sistemas de desplazamiento para robots móviles, entre los cuales podemos encontrar Ackerman, Triciclo clásico, Diferencial, Skid Steer, Síncrona, Omnidireccional, con patas, con oruga y sistemas apodos; ya que las aplicaciones de los vehículos guiados automáticamente son innumerables y a pesar de que uno de los sistemas más utilizados es el Diferencial por su estabilidad en superficies regulares, en el presente trabajo se plantea la elaboración de tres opciones alternativas que ofrezcan ventajas cuando en el recorrido se presenten cambios de superficies homogéneas como arena, piso, hierba corta, líquidos sin oleaje, etc.

Los sistemas propuestos no utilizaran el tradicional método de ruedas en contacto con la superficie como sistema de tracción y en su lugar se diseñaran, implementaran y validaran tres diferentes modelos de robots móviles que se pueda desplazar sin necesidad de que sus ruedas o extremidades estén en contacto directo con la superficie y se verificará cuál de las tres propuestas es más eficiente a nivel de velocidad, maniobrabilidad, velocidad, fuerza, peso, costo, etc., de igual forma se proponen sistemas a utilizar con el fin de superar los problemas de inercia, colisiones y cambios bruscos de dirección que pueden presentarse.

PROPUESTA UNO: Robot móvil dentro de una esfera la cual girara gracias a la acción de un eje transversal movido por un motor con un arreglo que brinde la reducción de velocidad y el aumento de torque necesario para lograr el desplazamiento de la esfera hacia adelante y hacia atrás; para el cambio de dirección o giro, utilizar un servomotor con un sistema que permita desplazar un contrapeso estilo pendular, que al cambiar el centro de gravedad del móvil modifique la dirección de giro del robot. PROPUESTA DOS: Robot móvil dentro de una esfera con movimiento de avance similar al de la propuesta uno, pero para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

el cambio de dirección implementar un sistema que permita la transferencia de un contrapeso a lo largo del eje de avance, el cual al mover el peso hacia los extremos del eje, cambia el centro de gravedad de la esfera y por lo tanto la dirección de giro del robot. PROPUESTA TRES: Robot móvil dentro de una esfera que utilice dos ruedas con motores independientes las cuales permanecerán en contacto con la parte interior de la esfera y realizaran los movimientos de avance, retroceso y cambios de giro de acuerdo a la activación individual o simultanea de los motores.

Estas plataformas robóticas móviles encapsuladas al interior de esferas, por su diseño, permiten adaptarse a los cambios de terreno planteado, facilitando su utilización en sistemas de vigilancia, monitoreo y acceso a sitios de acceso complejo, como es el caso de las superficies liquidas, etc.

En la primera parte del documento se brindaran conceptos básicos de los diferentes sistemas de desplazamiento para los robots móviles y sus diferentes alternativas, a continuación se profundizara en los modelos planteados de forma esférica, en la tercera parte se explicaran los modelos elaborados en el presente proyecto, método de construcción, algunos fundamentos matemáticos, diseño físico, mecánico, electrónico y método de control; finalmente se hablara de los resultados obtenidos, conclusiones y trabajos futuros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

La robótica ha jugado un papel muy importante durante el desarrollo de la humanidad, especialmente en las últimas décadas y su evolución ha ido siempre de la mano con la fabricación de dispositivos que realicen tareas que facilitan el trabajo humano. El concepto de robot comenzó a escucharse en 1920 del escritor checo Capek, en su obra dramática Rossum's Universal Robots, en la que utilizó el término robot a partir de la palabra checa robota, que significa servidumbre o trabajo forzado. Por su parte, Asimov introdujo, por primera vez, el término robótica, en su obra "I, Robot", incluyendo en ese mismo trabajo, las tres leyes de la robótica. (Grisales Ramírez, 2013).

A consecuencia de la aparición de la computadora y de la alta integración de circuitos, se pudieron desarrollar los primeros intentos de un verdadero robot en los años 40's. En 1952, aparece la primera máquina de control numérico para automatizar algunas tareas industriales. Por su parte, la compañía Unimates, introdujo el primer robot industrial en la General Motors en 1961; con la llegada de nuevas tecnologías de planificación y razonamiento automático, entre 1966 a 1972 se desarrolló en el SRI2 el primer Vehículo Guiado Automáticamente (VGA, por sus siglas en español), llamado Shakey, que era una plataforma móvil independiente, controlada por visión mediante una cámara y dotada con un detector táctil, Shakey era capaz de navegar en entornos cerrados estructurados de forma autónoma. (García, 2010).

Con respecto a su desplazamiento por una superficie, existen variadas configuraciones de robots móviles, tales como: marinos, aéreos, terrestres, de desplazamiento sobre fluidos, bípedos, hexápodos, entre otros; algunos logran locomoción por medio de patas, por bandas o ruedas, todos estos sistemas de locomoción dependen principalmente de la aplicación para la cual va a ser utilizado el vehículo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

De estos sistemas el más utilizado es el Diferencial, (García, 2010) esto se debe a que los robots móviles con ruedas son más eficientes en cuanto a su consumo de energía que los robots de patas o de orugas cuando son evaluados en superficies lisas y firmes. Por otro lado, los vehículos con ruedas requieren un número de partes menor y menos complejas en comparación con los robots de patas o de orugas, lo que permite que su construcción sea más fácil. Adicionalmente, el control de las ruedas es menos complejo que la actuación de las patas o de las orugas, además de que causan menor desgaste de la superficie en comparación con las bandas de las orugas.

2.1 Robots Móviles que utilizan Ruedas

De lo anteriormente expuesto se puede deducir que los vehículos con ruedas son la solución más simple para conseguir la movilidad en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos, aunque la locomoción mediante ruedas es poco eficiente en terrenos blandos (Bañó, 2003); algunos de los sistemas más comunes que utilizan ruedas para su desplazamiento son:

- El Ackerman o tipo coche: el sistema se basa en dos ruedas traseras tractoras que se montan de forma paralela en el chasis principal del vehículo, mientras que las ruedas delanteras son del tipo direccionamiento y se utilizan para seguir la trayectoria del robot, como se muestra en la Figura 1.

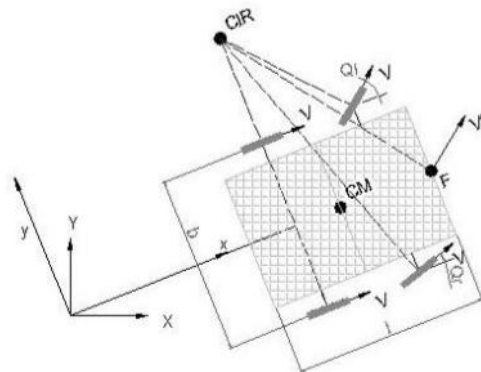


Figura 1. Sistema Ackerman o tipo coche (Bañó, 2003)

- Triciclo clásico: posee una rueda delantera que sirve tanto para la tracción como para el direccionamiento, el eje trasero, con dos ruedas laterales es pasivo y sus ruedas se mueven libremente, desafortunadamente presenta problemas de estabilidad en terrenos difíciles, se puede apreciar en la Figura 2.

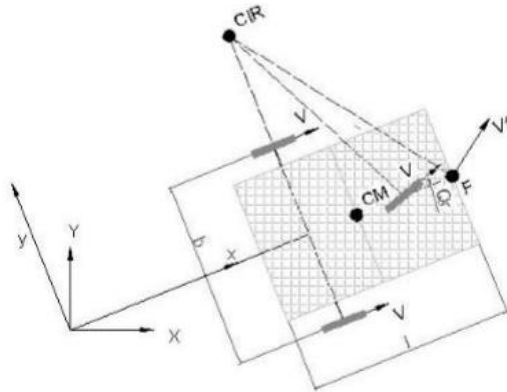


Figura 2. Sistema tipo Triciclo clásico (Bañó, 2003)

- Tracción diferencial: cómo podemos observar en la Figura 3, este tipo de direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales, las cuales proporcionan tracción y direccionamiento simultáneamente, tiene la posibilidad de cambiar su orientación sin movimientos de traslación girando sobre su centro de masa, por lo general en su diseño existe adicionalmente una o más ruedas de soporte.

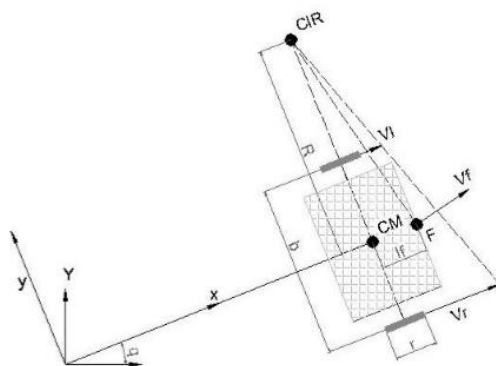


Figura 3. Sistema tipo Tracción diferencial (Bañó, 2003)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Skid steer: este sistema dispone de varias ruedas en cada lado que actúan de forma simultánea brindándole tracción y direccionamiento al robot, como se ve en la Figura 4.



Figura 4. Sistema tipo Skid steer (Bañó, 2003)

- Pistas de deslizamiento o tipo oruga: se puede apreciar en la Figura 5, que los vehículos tipo oruga son aquellos en los que tanto la impulsión como el direccionamiento se consiguen mediante pistas de deslizamiento laterales, poseen un buen rendimiento en terrenos irregulares.



Figura 5. Sistema tipo con Pistas de deslizamiento o tipo oruga (Bañó, 2003)

- Sincronas: como se observa en la Figura 6, este sistema consiste en la actuación simultánea de todas las ruedas que giran de forma síncrona, tanto para tracción como para dirección.

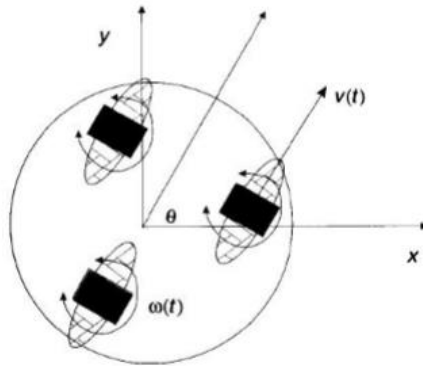


Figura 6. Sistema tipo Sincronas (Bañó, 2003)

- Tracción omnidireccional: similar al anterior modelo, se basa en la utilización de tres ruedas directrices y motrices con sus respectivos grados de libertad, lo cual les permite moverse en cualquier dirección con respecto al plano, ver Figura 7.

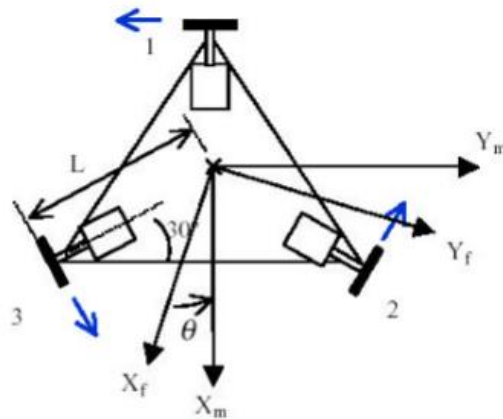


Figura 7. Sistema tipo Tracción omnidireccional (Bañó, 2003)

Para lograr el desplazamiento de algunos de los modelos relacionados anteriormente se deben utilizar ruedas diferentes a las convencionales, como las omnidireccionales, las cuales se definen como una rueda estándar a la cual se la dotado de una corona de rodillos, cuyos ejes de giro resultan perpendiculares a la dirección normal de avance, de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

este modo, al aplicarle una fuerza lateral, los rodillos giran sobre sí mismos y permiten que la componente de velocidad en un vector X no sea nulo, y por tanto, se elimina la restricción de no holomicidad (Tecnol & Ochoa, n.d.). Este tipo de rodadura es la utilizada en los robots omnidireccionales

Para el análisis cinemático de los diferentes modelos, generalmente se asumen algunos criterios como:

- El robot se mueve sobre una superficie plana, libre de irregularidades de nivel y textura.
- No existen elementos flexibles en la estructura del robot (incluidas las ruedas).
- Las ruedas poseen uno o ningún eje de direccionamiento, de manera que este último siempre es perpendicular al suelo.
- No se consideran ningún tipo de fricciones en elementos móviles del vehículo, o contra el suelo.
- Los ejes de desplazamiento son perpendiculares a la superficie de trabajo.
- Se despreciará el deslizamiento del robot durante el movimiento.
- La estructura del robot es totalmente rígida, no se consideran en el diseño partes flexibles.

En definitiva, de forma independiente al tipo de rueda empleado, la cinemática directa tiene como objetivo el cálculo de la velocidad lineal y angular del robot a partir de las correspondientes aportaciones de cada una de sus ruedas y la dinámica considera la evolución de la posición, velocidad y aceleración del robot en respuesta a los pares de actuación de las ruedas. (Tecnol & Ochoa, n.d.)

De los sistemas mostrados anteriormente el más usual para el desplazamiento se basa en el uso de ruedas de tracción diferencial, el cual es un sistema poco complejo y adecuado para la navegación en algunos entornos de desarrollo típicos de actividades humanas, por ejemplo oficinas, bodegas y otros; las configuraciones de tracción diferencial, son muy

populares y permiten calcular la posición del robot a partir de las ecuaciones geométricas, que surgen de la relación entre los componentes del sistema de propulsión y de la información de los codificadores rotativos que usualmente llevan acoplados a sus ruedas, este método de localización se conoce como estimación odométrica. (La, Odométrica, V, & O, 2009)

A continuación, en la Figura 8, se puede observar un resumen de los principales métodos de desplazamiento para robots móviles que utilizan ruedas.

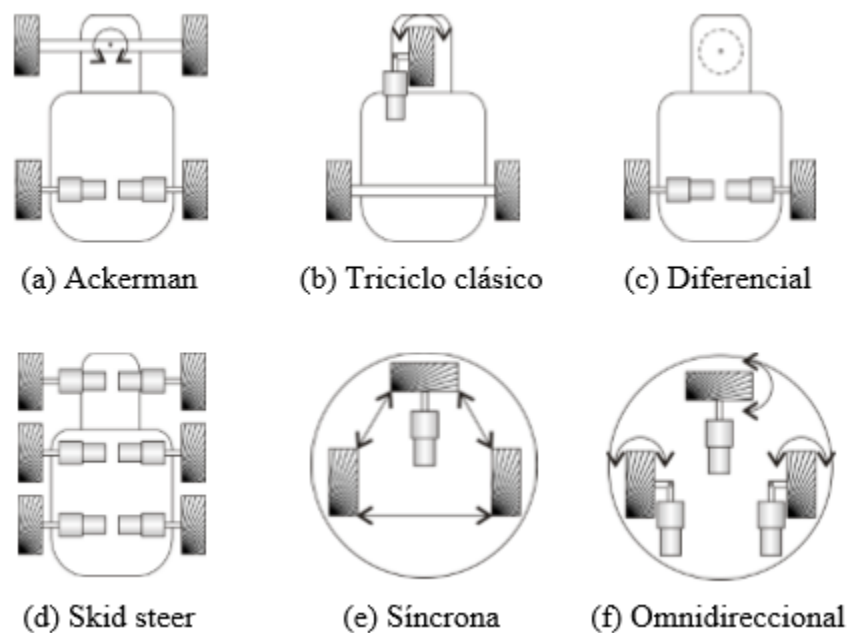


Figura 8. Diferentes sistemas de desplazamiento con ruedas.(García, 2010).

2.2 Robots Móviles Esféricos

A pesar de las múltiples ventajas de los sistemas robóticos con ruedas expuestos anteriormente, cuando estos sistemas por necesidades del proceso se ven obligados a cambiar el tipo de superficie por la cual se desplazan, por ejemplo de piso a arena, a hierba, a lodo, a nieve o a agua sin oleaje como la de los tanques, se presentan restricciones en el desplazamiento y atascamientos a menos que se modifique el tipo de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sistema de desplazamiento o por lo menos la geometría y material de las ruedas utilizadas. Por lo anterior en el presente proyecto se plantea la realización de tres sistemas mecatrónicos que utilicen un sistema de desplazamiento diferente, capaz de funcionar efectivamente en las superficies relacionadas sin que se requiera modificación física de los mismos.

En la búsqueda de lograr este objetivo encontramos que los robots móviles esféricos pueden superar con facilidad las restricciones planteadas; es de anotar que el término robot esférico se utiliza para describir dos tipos muy diferentes de robots; comúnmente, un robot esférico es un brazo de robot que forma un sistema de coordenadas esférico con dos juntas rotativas y una junta prismática, sin embargo el término robot esférico también se utiliza para describir a los robots móviles, "tipo bola", que se mueven por el suelo en una cáscara esférica externa, esta segunda definición es el foco de este estudio de este proyecto y cualquier referencia al término robot esférico se refiere a la variedad móvil "tipo bola".

La forma esférica de esta clase de robot móvil ofrece varias ventajas sobre otras formas de locomoción superficial como ruedas, vías o piernas; la esfera es una protección fuerte que ofrece rigidez en todos los puntos en su superficie, puede proporcionar un nivel muy alto de robustez sin mayores puntos de debilidad, mientras que las ruedas, las pistas o las piernas pueden ser dañadas, potencialmente inhabilitando la capacidad de un robot de moverse. La cáscara también puede ser resistente y sirve como una barrera protectora entre el ambiente exterior y el equipo ubicado en la parte interior, esta protección puede ser en forma de robustez a los impactos o como barrera contra productos químicos peligrosos y condiciones ambientales (Schroll, 2010). La envoltura esférica puede ser sellada para flotar o sumergirse en líquido y también evitar que el polvo dañe componentes mecánicos y electrónicos ubicados al interior.

Con respecto a los robots en forma de esfera, a lo largo de la historia, los juguetes en forma esférica han sido y son muy populares; los avances en tecnología informática, transferencia de datos inalámbrica y sistemas de cámaras les han brindado capacidades operativas avanzadas. Los robots autónomos en forma de esfera están siendo introducidos de nuevo en los hogares modernos, esta vez no sólo como juguetes, sino también como sistemas de servicio y vigilancia. Probablemente el trabajo futuro en este campo se concentrará en analizar y desarrollar la dinámica y el sistema de control más eficiente para la esfera, así como sobre las aplicaciones y la interacción con el medio ambiente y las personas (Ylikorpi & Suomela, 2007). La mayoría de estos robots basan su funcionamiento en el cambio de su centro de masa para su desplazamiento; a continuación se muestran algunas técnicas y modelos estructurales de robots móviles esféricos, el control de sus grados de libertad, su método de tracción interna y sus métodos de control.

Los primeros juguetes mecánicos con forma esférica aparecieron en 1893, los cuales permitían movimiento solo en una dirección y eran impulsados por resortes, posteriormente se acondicionaron sistemas mecánicos para generar cambios de dirección, como se ve en la Figura 9.

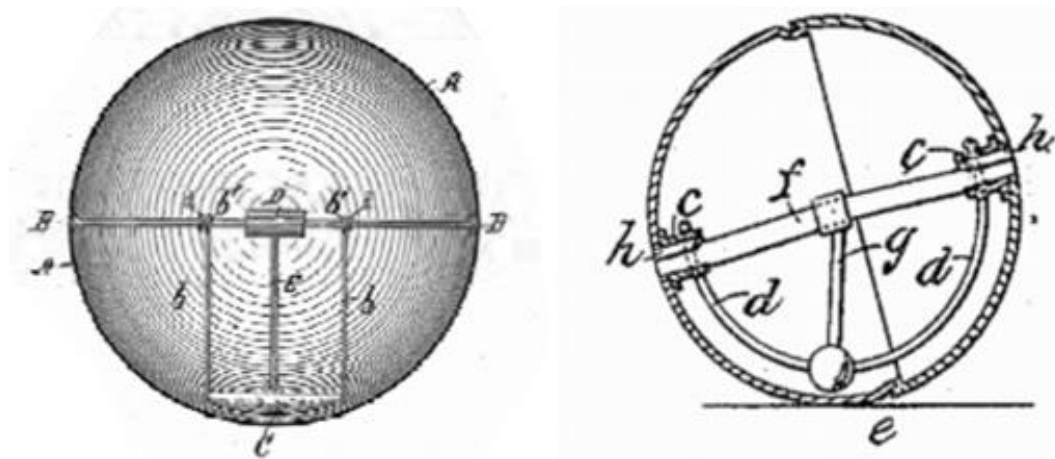


Figura 9. (Izq.) Toy por J.L. Tate; (Der.) Dispositivo auto-impulsado por B. Shorthouse. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

En 1909 apareció el juguete mecánico creación de E.E. Cecil, mostrado en la Figura 10, el cual generaba un movimiento semi-aleatorio causado por el cambio de posición de una masa adicional

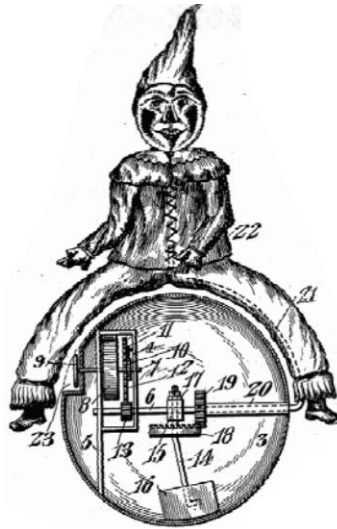


Figura 10. Juguete mecánico por E.E. Cecil. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

Estos sistemas no solo se han utilizado como juguetes, en 1889 la marina norteamericana utilizo este sistema en vehículos para transporte humano, posteriormente para desplazarse por encima del agua se les agrego un sistema de pedales para generar el movimiento y control de la dirección como se observa en la figura 11, de izquierda a derecha, el desarrollado por W. Henry, J.E. Reilley, C. Mapletorphe y L. R. Clark Jr.

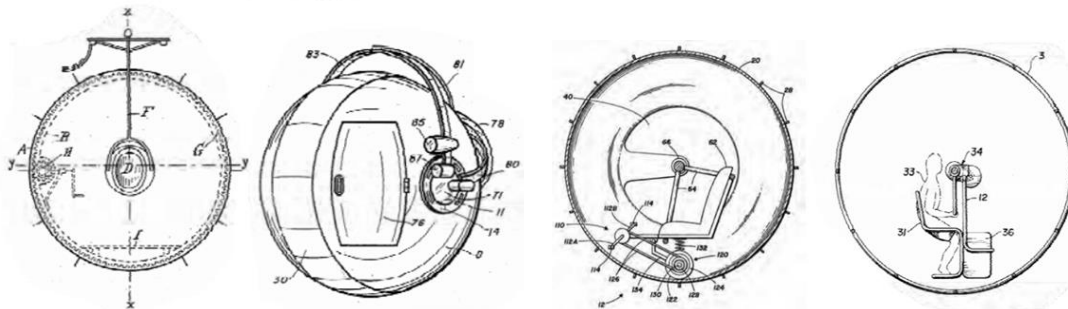


Figura 11. Vehículos para transporte humano de la marina. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

En la Figura 12 se muestran los modelos de juguetes eléctricos con uno y dos grados de libertad que aparecieron en los años 1957 y 1958.

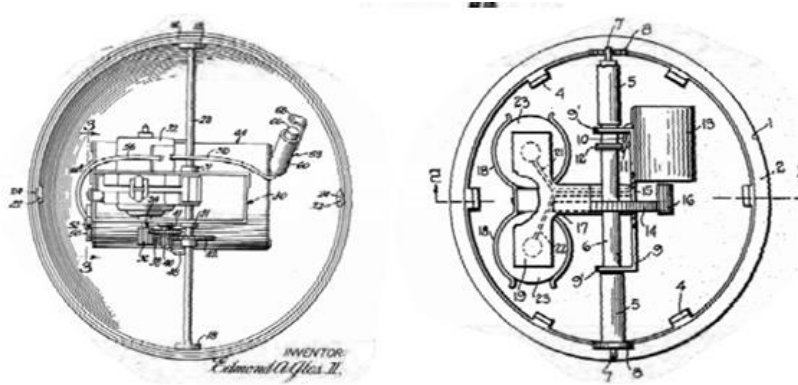


Figura 12. (Izq.) Juguete por E. A. Glos; (Der.) Juguete por J.M. Easterling 1957. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

El sistema de control de vehículo esférico de L. R. Clark Jr. et al. En 1985 (Patente de Estados Unidos 4.501.569), mostrado en la Figura 13, se parece a una versión motorizada del vehículo auto-impulsado desarrollado por B. Shorthouse de 1906, el cual además de poseer dos grados de libertad, el diseño de Clark también proporciona control completo de ambos por medio de dos servomotores, un motor conduce la pelota hacia adelante y el otro mueve el péndulo y ajusta la posición del eje de balanceo. El control continuo es realizado con equipos vía radio-control

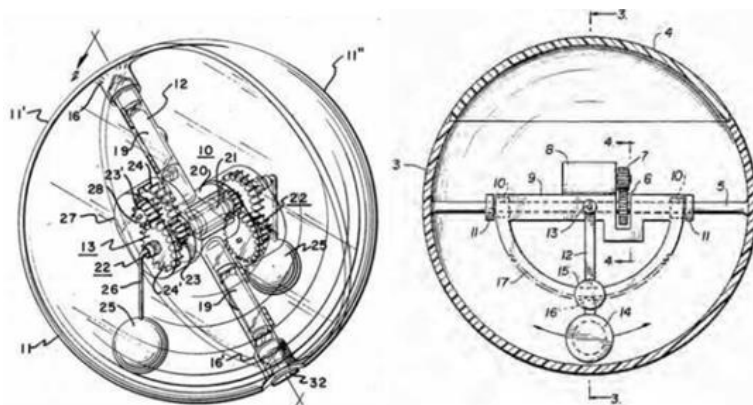


Figura 13. (Izq.) Juguete por McKeehan; (Der.) Juguete por L. R. Clark Jr. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El contrapeso se construye generalmente con una palanca girando alrededor del eje del punto de rotación, el movimiento es proporcionado generando par directamente a la palanca. La cantidad del par de torsión necesario del sistema de potencia era directamente proporcional al contrapeso y a la longitud del brazo de palanca.

En 1918, A. D. McFaul patentó un diseño de bola de hámster (un derivado de una rueda de ardilla), donde el contrapeso es movido por la fricción entre la superficie interior de la esfera y unas ruedas de tracción montadas sobre el contrapeso. En este modelo, la longitud del brazo de palanca ya no afecta al par motor de potencia, pero el diámetro de las ruedas sí, de modo que logró una movilidad similar con un menor par interno; en el diseño de McFaul aparece un solo eje con dos ruedas de tracción apoyadas en la superficie interna de la esfera, mientras que en el diseño de C. E. Merrill se colocó un vehículo de tres ruedas libremente dentro del balón en 1973 (Patente de Estados Unidos 3.722.134). Posteriormente, aparecieron varias patentes en las cuales colocaron un vehículo de tres o cuatro ruedas dentro de la esfera. Algunos vehículos están completamente libres dentro, mientras que otros tienen algún apoyo estructural dentro de la bola; Véase la Figura 14.

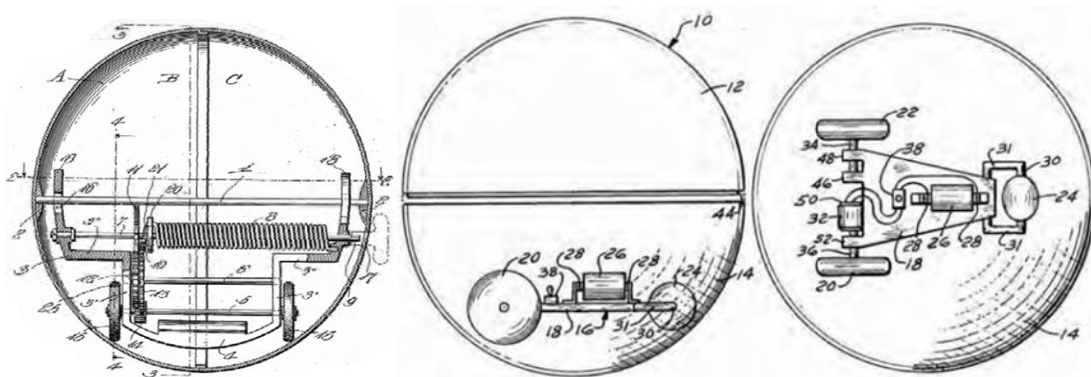


Figura 14. (Izquierda.) Modelo Hámster por A. D. McFaul; (Centro y derecha.) Modelo Hámster por C. E. Merrill. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El Laboratorio de Tecnología de Automatización de la Universidad de Tecnología de Helsinki también desarrolló robots en forma de bola para actuar como asistentes de hogar desde 1995. En la Figura 15 podemos ver el sistema denominado “Rollo”, el cual puede actuar como un teléfono móvil, sistema para recordar eventos y guardia de seguridad.



Figura 14. Modelo Rollo por TKK, 2da, 1ra y 3ra generación. (Ylikorpi & Suomela, 2007).

Este modelo poseía un tablero de instrumentos bastante grande a lo largo del eje de balanceo, también lleva un ordenador a bordo y herramientas avanzadas de comunicación e interactividad, como cámara, micrófono y un enlace de video; la comunicación con la estación de control se conseguía mediante un módem de radio. El robot estaba equipado con un microcontrolador Phytex MiniModul-167. El robot tenía además sensores de temperatura, panorámica, inclinación, sistema mecánico interna y encoders de impulsos para la medición de la rotación del motor.

En (Crossley, 2006) se desarrolla un trabajo sobre un robot esférico que genera su desplazamiento y cambio de dirección gracias a un sistema de dos ruedas oblicuas ubicadas en la parte inferior de la esfera y también menciona un modelo que consta de dos hemisferios independientes de la esfera con los cuales se logra el desplazamiento del vehículo, como puede observarse en la Figura 15.

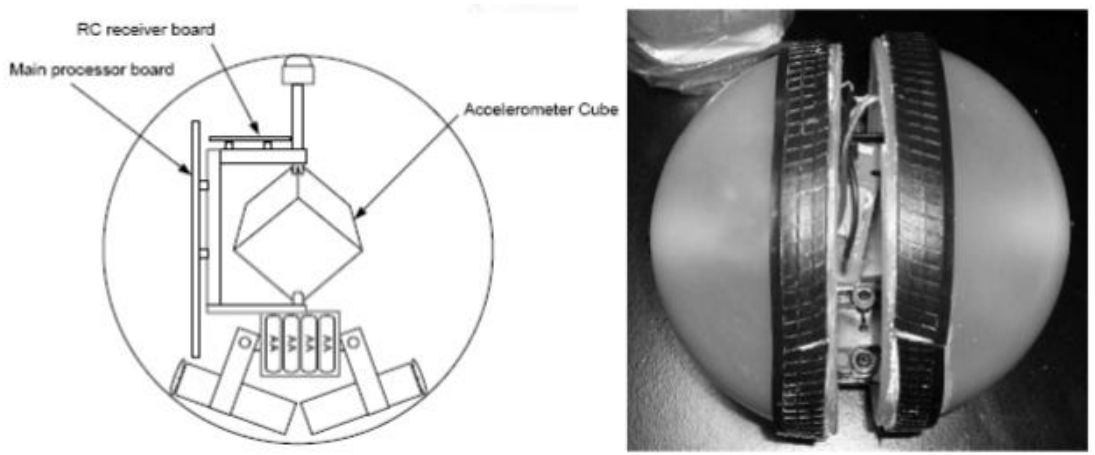


Figura 15. (Izq.) Diseño de dos ruedas. (Der.) Diseño de hemisferios independientes.
(Crossley, 2006)

De igual forma en el mismo documento se menciona un modelo desarrollado basándose en un sistema de péndulo (Crossley, 2006), en la Figura 16 se muestra un esquema de los componentes internos de un robot llamado Rotundus, este diseño consiste en un motor unido al eje horizontal que atraviesa la esfera, en el centro hay un péndulo que baja y cuando el motor está activado, la esfera se moverá mientras el peso del péndulo tenga suficiente inercia para hacer girar la carcasa. El péndulo puede moverse hacia la izquierda y hacia la derecha, haciendo que el robot gire, cambiando la dirección de su desplazamiento.

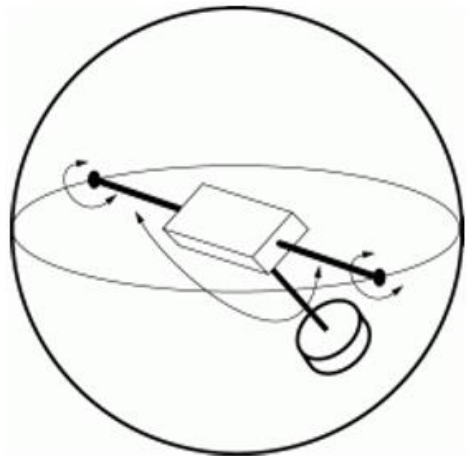


Figura 16. Diseño pendular. (Crossley, 2006)

En (Schroll, 2010) realizan un análisis de un modelo de robot esfera que funciona mediante el cambio de masas múltiples, el concepto de cambio de masa múltiple incorpora 3 o 4 masas que se pueden mover independientemente a lo largo de guías lineales dentro de la esfera, mediante la coordinación de los cambios de las masas, la posición del centro de masa de la esfera puede controlarse permitiendo que la esfera se mueva en una dirección deseada. En la Figura 17 observamos dos configuraciones del concepto de cambio de masas múltiples.

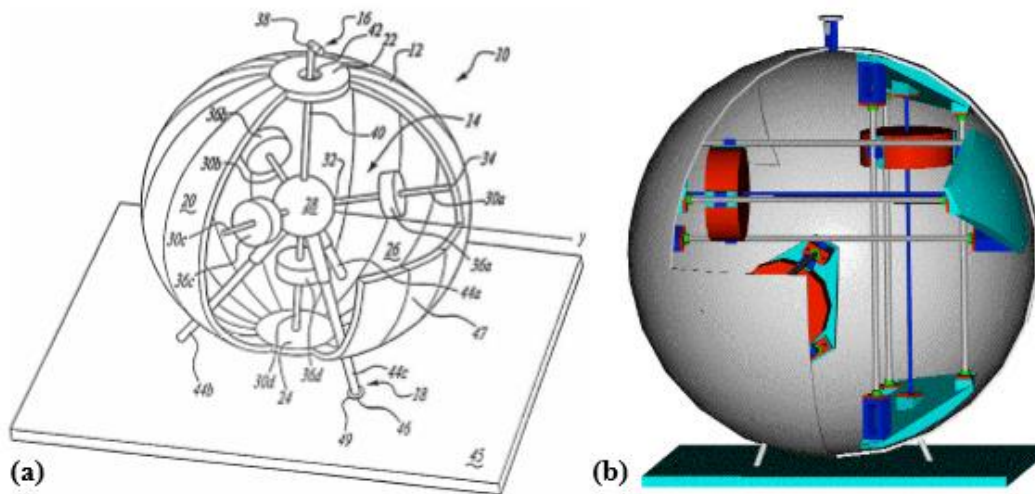


Figura 17. (a) Diseño Radial. (b) Diseño perpendicular. (Schroll, 2010)

La característica más significativa del concepto de cambio de masas múltiples es que es completamente omnidireccional. Una esfera con este mecanismo de propulsión puede comenzar instantáneamente a moverse en cualquier dirección desde un punto muerto; también puede ofrecer un control muy preciso del centro de masa de la esfera; sin embargo el diseño mecánico tiende a ser muy complejo, y los controles necesarios para coordinar las masas también son complicadas, ya que para rodar rápidamente en línea recta, las masas deben moverse rápidamente a lo largo de sus ejes, lo que puede requerir actuadores de alta potencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un grupo de estudiantes de la Universidad Nacional Kyungpook de Corea desarrollo un nuevo tipo de robot esférico que tiene dos brazos. Este robot, llamado KisBot, consta mecánicamente de tres partes, un cuerpo en forma de rueda y dos semi-esferas giratorias. En el lado de cada semi-esfera, existe un brazo que se diseña basado en el mecanismo de la corredera-manivela para lograr eficacia en el espacio del robot como vemos en la Figura 18.

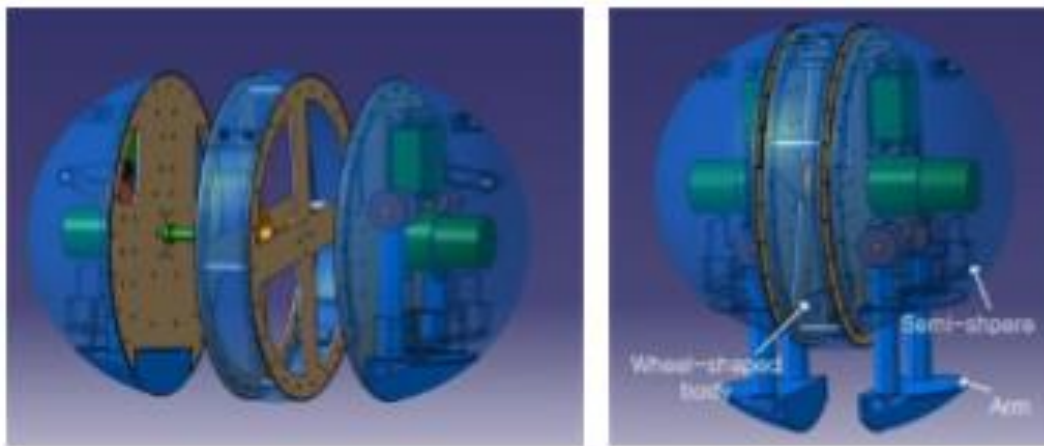


Figura 18. Diseño Robot Kisbot. (Ahn, Kim, & Lee, 2010)

KisBot tiene un sistema de conducción híbrido: balanceo y rueda. En el modo de balanceo, el robot dobla sus brazos a través de sí mismo y los utiliza como péndulo, entonces el robot funciona como un robot impulsado por el péndulo. En el modo de rueda, dos brazos se extienden desde el interior del robot y se ponen en contacto con el suelo, entonces el robot funciona como un coche de una rueda. Los brazos del robot se pueden utilizar como un freno durante el modo de rodadura y añadir fricción al robot para subir una pendiente durante el modo de rueda, procedimientos mostrados en la Figura 19. (Ahn et al., 2010)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

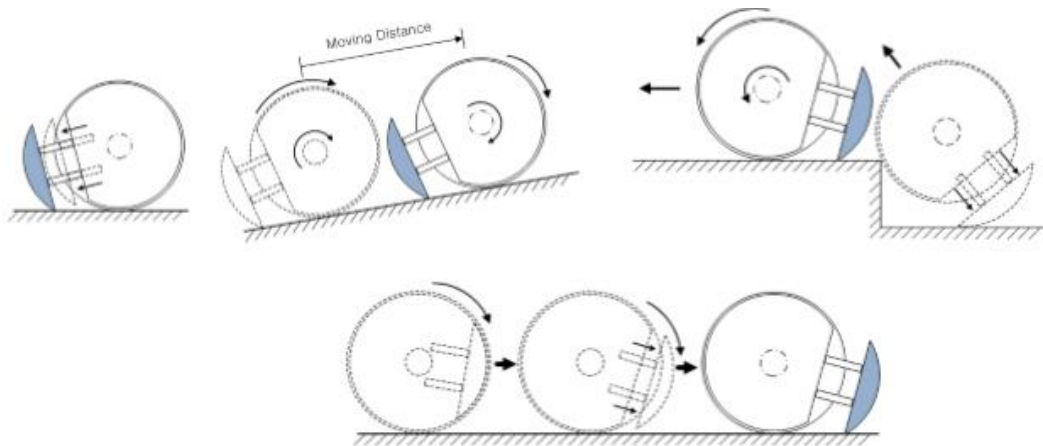


Figura 19. Aplicación brazos Robot Kisbot (ascenso, escalado y frenado). (Ahn et al., 2010)

Adicionalmente a los anteriormente relacionados, existen muchos otros modelos de robot en forma esférica, con diferentes sistemas mecánicos y de control, pero para el presente proyecto nos centraremos principalmente en los modelos tipo hámster y el modelo pendular.

2.3 Ventajas de los Robots Móviles Esféricos

Hay muchas ventajas para un diseño de robot esférico, por ejemplo:

- Son muy maniobrables.
- Pueden ser diseñados para ser holonómicos, para que puedan moverse en cualquier dirección, esto aumenta las opciones para navegar alrededor de los objetos y evita que el robot se atasque en las esquinas.
- Los robots esféricos tampoco pueden volcarse debido a su carcasa mientras que los robots de ruedas tradicionales pierden su utilidad si aterrizan al revés, caso que no se presenta con un robot esférico.
- Tienen una gran capacidad para recuperarse de colisiones con obstáculos, característica que sería útil en una aplicación de enjambre, donde muchas esferas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

podrían estar viajando muy cerca, y debido al diseño no interferirían con el movimiento del otro. (Crossley, 2006).

- Tienen un solo punto de contacto con la superficie, lo cual permite la locomoción se realice con fricción mínima, ahorrando de esta forma energía.
- Gracias a su forma esférica se recupera fácilmente de colisiones con obstáculos desconocidos. (Joshi, Banavar, & Hippalgaonkar, 2010).
- Se pueden incluir sensores dentro de la carcasa esférica
- Posee un centro de gravedad bajo.

Sin embargo también se presentan algunas desventajas, como la dificultad en la utilización de sensores que actúen con el exterior mientras el cuerpo de la esfera este rotando, que el robot debe ser controlado remotamente ya que no permite la comunicación por cables, el sistema de control puede llegar a ser más elaborado, etc.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

El presente proyecto consiste en el desarrollo de tres plataformas robóticas móviles que funcionen dentro de esferas, las cuales difieren en su sistema mecánico y de control; pero que puedan superar los inconvenientes presentados al inicio del proyecto, como son los desplazamientos por diferentes superficies, piso, arena, hierba, etc., omitiendo las líquidas, ya que la esfera utilizada no permite el sello.

3.1 Robot Esférico Pendular

Como se vio en el estado del arte, el modelo pendular plantado en (Crossley, 2006), consta de dos sistemas mecánicos que actúan simultáneamente, uno le brinda el desplazamiento adelante y atrás a la esfera, mientras que el péndulo realiza el cambio de dirección al desplazar el centro de masa de la esfera mientras se mueve. Una desventaja del diseño del péndulo con respecto a los otros conceptos es que el diseño mecánico es delicado, la totalidad de la estructura interna cuelga de un solo eje unido a la esfera en sólo dos puntos, lo que hace necesario que estos elementos sean suficientemente fuertes para soportar los impactos, además que el par de torsión del eje de accionamiento principal interior es significativamente mayor que el par requerido en el diseño de la bola de hámster; otra desventaja es que los dos puntos en la esfera donde se une con el eje principal son críticos en los casos de impactos y que el mecanismo de accionamiento del péndulo no es omnidireccional ya que una vez parada la esfera, debe impulsarse y comenzar a viajar en la misma trayectoria instantánea antes de viajar en un arco para cambiar de dirección.

Para el desarrollo de este prototipo, como se observa en la Figura 20, se utilizó una esfera de acrílico transparente de 17,8 cm de diámetro, manufacturada por una empresa china llamada Rainbow como sistema de ejercicio para mascotas, ya que este elemento permite

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ver y entender el mecanismo interno inclusive cuando se encuentra en funcionamiento y que posee la rigidez necesaria para proteger los elementos mecánicos y electrónicos incorporados para su funcionamiento.

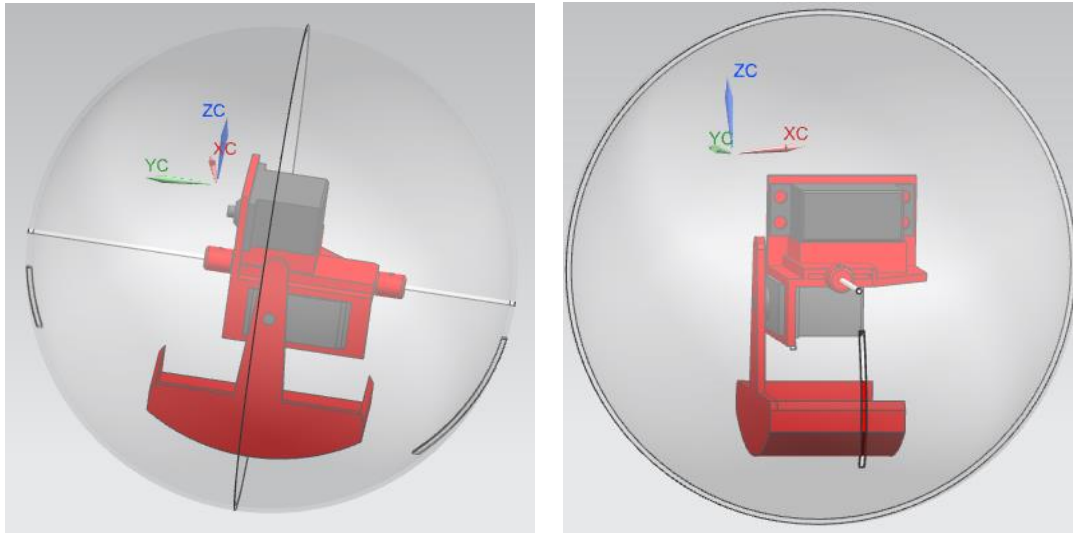


Figura 20. Modelo pendular. (Diseño del autor en NX 10)

Para generar el movimiento de la esfera se utilizaron dos servomotores futaba S3003, el que gobierna el péndulo trabaja entre 0 y 180 grados y sobre él se realizara el control de la posición angular del brazo o péndulo, mientras que el de avance y retroceso fue truncado mecánicamente para que gire 360 grados y sobre este se realiza control de activación y velocidad angular; ambos servomotores cuentan con las siguientes características:

Velocidad: 0.23 seg/60 grados (260 grados/seg)

Par de salida: 3.2 Kg-cm (0.314 N.m)

Dimensiones: 40.4 x 19.8 x 36 mm

Peso: 37.2 gr

Frecuencia. PWM: 50Hz (20ms)

Rango giro: 180 grados

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Teniendo en cuenta que cualquier servomotor convencional puede truncarse para lograr rotación continua, y que los servomotores de 180 grados son más económicos, se desensambló el servomotor y con la ayuda de un bisturí y un motor-tool se removió la restricción mecánica que asegura máxima rotación a 180 grados y se fijó el potenciómetro interno al valor medio; con estas modificaciones la señal de PWM enviada al servomotor pasa de ser un control de posición a controlar la velocidad de giro del mismo.

Para controlar los servomotores se cuenta con un microcontrolador Arduino Fio, como el mostrado en la Figura 21, diseñado y manufacturado por Sparkfun Electronics, El Arduino Fio es un microcontrolador basado en el ATmega328P que funciona a 3.3V y 8 MHz. Cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida, de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM, 8 entradas analógicas, un oscilador incorporado, botón de reinicio y agujeros para montar cabezales de clavijas. Tiene conexiones para una batería de polímero de litio e incluye un circuito de carga por USB, además de un zócalo XBee disponible en la parte inferior del tablero para la comunicación inalámbrica; el diagrama de comunicaciones y control se puede observar en la Figura 22.



Figura 21. Arduino Fio y módulo Xbee. (Obtenidas de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardFioProgramming>)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

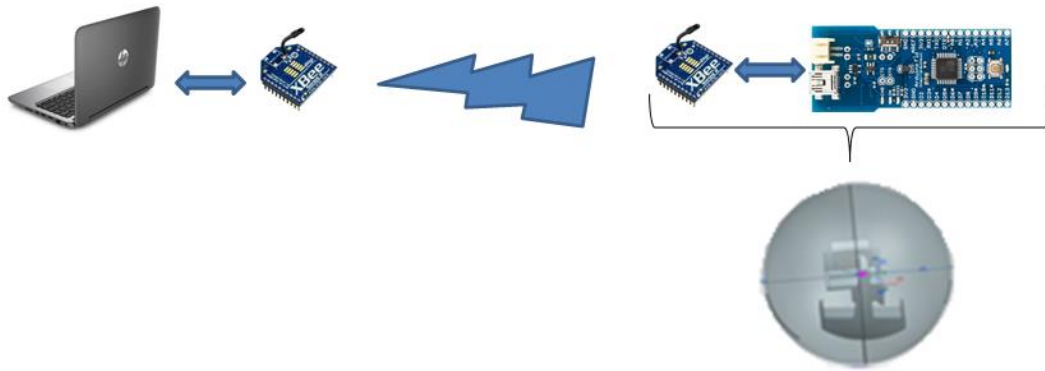


Figura 22. Flujo de comunicación y control. (Diseño del autor en PowerPoint 2010 y Paint versión 1607)

A este dispositivo con el fin de realizar el control de la esfera se le cargo un programa básico para el control inalámbrico independiente de cada uno de los motores y se controla directamente por el teclado de un computador de acuerdo a lo mostrado en la Figura 23 en una terminal para comunicación serial como la que trae por defecto el programa XCTU con el cual adicionalmente se programa el módulo Xbee serie 1 utilizado.

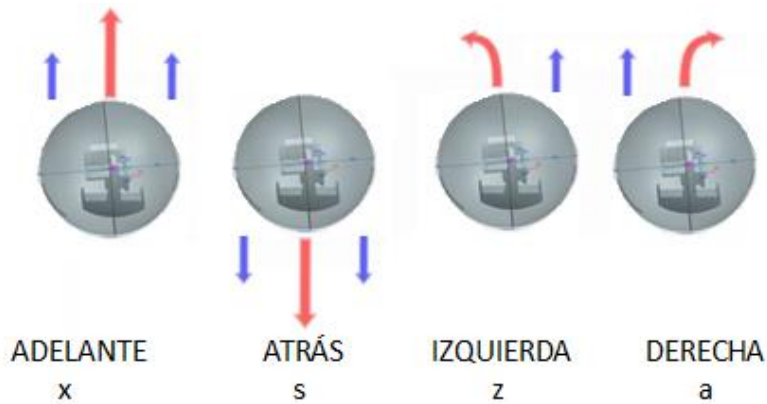


Figura 23. Teclas de control para esfera con sistema de Péndulo (Diseño del autor en PowerPoint 2010 y Paint versión 1607)

Con las letras en minúscula “x” se inicia el desplazamiento del móvil hacia adelante, con la “s” se hace regresar hacia atrás, gobernando de este modo el servomotor que genera la rotación de la esfera; con las letras “z” y “a” se controla la posición angular del brazo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

encargada de ocasionar el cambio de dirección, con la letra “p” se produce lleva ambos motores a el estado de reposo, deteniendo el avance de la esfera y ubicando el péndulo en posición central; el programa básico de control manual de los servomotores para la velocidad de avance de la esfera y el cambio del centro de masa del péndulo, sin incluir rutinas adicionales, se detalla en el Apéndice B.

En el montaje se utilizaron dos baterías de polímero de litio de 3,7V a 1000 mAh, la primera para alimentar el sistema de control del Arduino Fio y comunicaciones seriales inalámbricas del Xbee; la segunda batería se utilizó para alimentar los dos servomotores. Es importante recordar que las tierras de ambas baterías, las de los dos servomotores y las del Arduino Fio deben estar unificadas para un correcto funcionamiento del sistema.

3.2 Robot Esférico Tipo Bola De Hámster

Un sistema robótico móvil del estilo bola de hámster es un montaje con un sistema mecatrónico interno que conduce desde el interior (Inside Driving Unit, IDU), transfiriendo energía directamente a la superficie interior de la esfera, el mecanismo del IDU puede tomar la forma de un carro interno o de un miembro central con resorte como se muestra en la Figura 24.

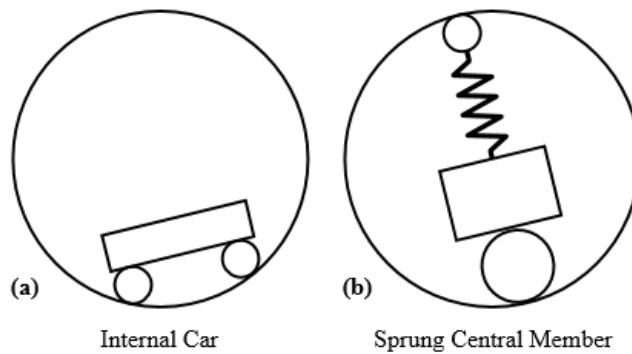


Figura 24. Concepto de Bola de Hámster. (Schroll, 2010)

El comportamiento del diseño interno del coche se asemeja a un hámster dentro de una bola del hámster; cuando el coche empieza a subir por la superficie interior, la esfera comenzará a rodar hacia delante; el coche puede tener 4 ruedas como un vehículo de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

pasajeros o 3 ruedas como los triciclos, o en lugar de ruedas, el coche podría tener cintas de oruga como un tanque, ya que el control direccional de la esfera se realiza accionando el automóvil interno en la dirección deseada, puede utilizarse una variedad de mecanismos de dirección bien conocidos, tales como dirección de 4 ruedas tipo Ackerman o el sistema de dirección diferencial. El concepto de bola de hámster tiene varias ventajas, tanto el coche interno como los demás componentes localizan la mayoría de su masa en la parte inferior en contacto con la parte interna de la esfera, lo que ayuda a maximizar el rendimiento. Estos modelos son relativamente simples en el diseño y sus mecanismos de accionamiento son fáciles de controlar debido a que la salida del accionamiento final son unas ruedas pequeñas en comparación con el diámetro total de la esfera, por lo tanto el par de salida requerido para mover la esfera es significativamente menor que con otros diseños. (Schroll, 2010)

En los modelos Hámster elaborados por A. D. McFaul y por C. E. Merril. (Ylikorpi & Suomela, 2007), podemos darnos cuenta que el principio de funcionamiento interno es muy diferente al planteado en el modelo pendular, aunque también funciona con dos servomotores Futaba S3003, en este caso ambos fueron truncados mecánicamente para que puedan girar 360 grados y se les realiza control a la activación y a la velocidad independientemente por cada rueda, en la Figura 25 puede apreciarse el diseño del prototipo denominado bola de hámster.

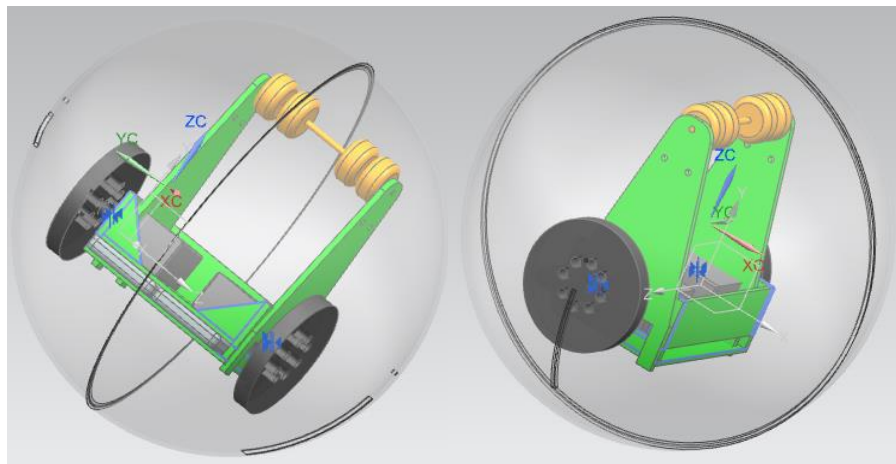


Figura 25. Modelo bola de hámster (Diseño del autor en NX 10)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para controlar los servomotores se cuenta con un microcontrolador Arduino Fio, como el del montaje tipo pendular con su respectivo módulo XBee disponible en la parte inferior del tablero para la comunicación inalámbrica; para realizar el control de la esfera se le cargo a este modelo un programa básico para el control inalámbrico independiente de cada uno de los motores y al igual que el modelo anterior también se controla directamente por el teclado de un computador de acuerdo a lo mostrado en la Figura 26 desde una terminal para comunicación serial como la que trae por defecto el programa XCTU.

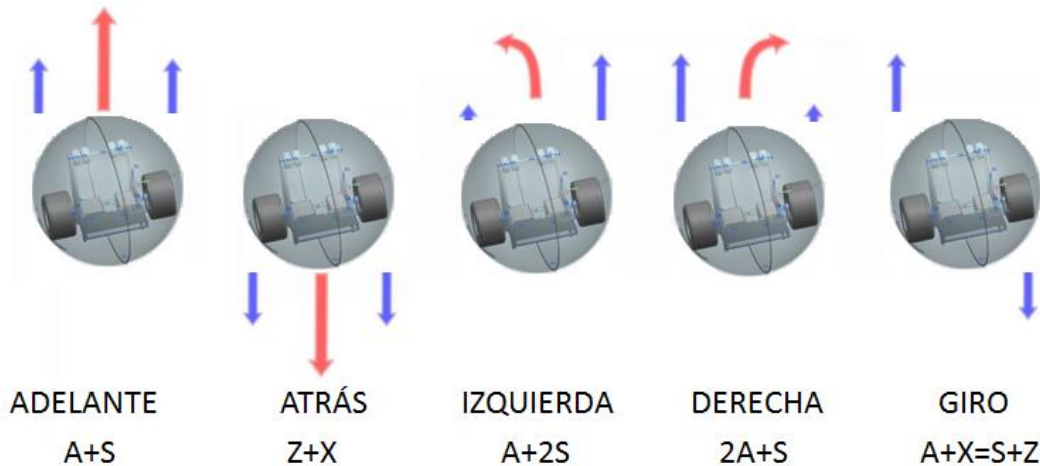


Figura 26. Teclas de control para esfera con sistema Bola de Hámster. (Diseño del autor en PowerPoint 2010 y Paint versión 1607)

Con las letras en mayúsculas “A+S” se inicia el desplazamiento del móvil hacia adelante activando ambos servomotores en la misma dirección, con las letras “Z+X” se hace regresar hacia atrás, así las ruedas generan rotación de la esfera; con las letras “A+S+S” se produce el giro hacia la izquierda, con “A+A+S” se gira hacia la derecha, con las combinaciones “A+X” o “S+Z” se logra que el vehículo realice rotación sobre su propio centro de masa sin generar desplazamiento; finalmente con la letra “P” se detienen ambos servomotores. El programa básico de control manual de los servomotores para la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

velocidad de avance de la esfera y el cambio de dirección, sin incluir rutinas adicionales, puede observarse en el Apéndice D.

En el montaje Bola de Hámster también se utilizaron dos baterías de polímero de litio de 3,7V a 1000 mAh, conectadas de forma similar al montaje de Péndulo.

3.3 Robot Esférico Tipo Pendular Modificado

El robot móvil esférico desarrollado a continuación, es una modificación del sistema pendular utilizado por el primer prototipo, el cual para poder modificar su centro de masa cambia la posición angular del contrapeso y debe por lo tanto retener esa posición hasta que la esfera se ubique en la orientación deseada para poder centrar nuevamente el contrapeso, esta tarea exige que el servomotor retenga el contrapeso y por lo tanto se ejerce en este elemento una fuerza notable hasta que es ubicado nuevamente en la posición central; para solventar este inconveniente se realizó una modificación al montaje de modo que sobre el eje que hace girar la esfera sirva de guía a un sistema mecánico de piñón-cremallera encargado de transferir los contrapesos de un lado a otro de la esfera de forma paralela al eje central de avance , generando de esta forma el cambio de dirección de la esfera. El desplazamiento lateral de los contrapesos se logra gracias a un servomotor con restricción de 180 grados que actúa sobre el piñón y que por lo tanto desplaza la cremallera con las masas de un lado a otro de la esfera.

Para elaborar este prototipo se realizó el diseño de las partes, ensamble y simulación en el programa NX 10 de Siemens, como se observa en la Figura 27, posteriormente se imprimieron las piezas, se ensamblaron las partes impresas y se incorporaron los dos servomotores, el de 180 grados para cambio de dirección y el de 360 grados para avance y retroceso de la esfera, ambos controlados mediante PWM; además de los dos servomotores, este modelo cuenta con un microcontrolador PIC16F886 de la empresa Microchip, un módulo bluetooth HC05 para la transmisión de las instrucciones desde un dispositivo móvil y dos baterías de litio de 3.7 V a 1000 mAh.

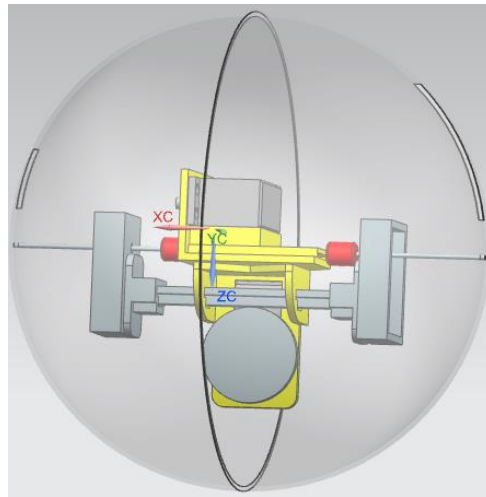


Figura 27. Robot esférico Pendular Modificado. (Diseño del autor en NX10)

Para poder ejercer control sobre este elemento se utilizó comunicación vía bluetooth entre un dispositivo móvil celular o Tablet en el cual se encuentre instalada la App diseñada en App inventor para tal fin, la pantalla del sistema de control manual puede verse en la Figura 28.

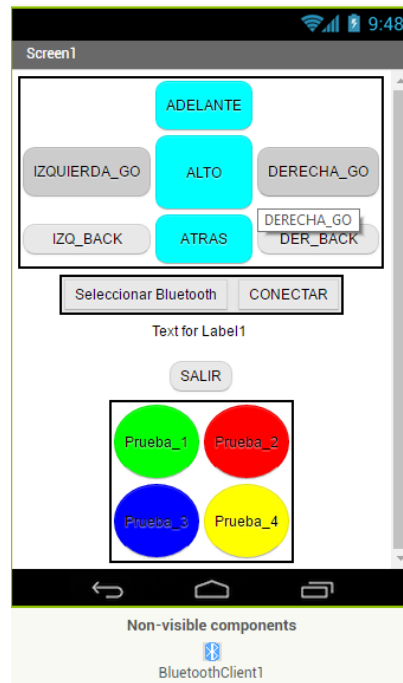


Figura 28. Consola de control App inventor desde dispositivo móvil. (Diseño del autor)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se mencionó anteriormente para la elaboración de este programa se utilizó una herramienta online provista por el MIT denominada App inventor, en esta plataforma se puede ingresar desde un navegador de internet a la dirección <http://appinventor.mit.edu/explore/> opción "Create apps!", desde allí pueden realizarse programas a la medida compatibles con los dispositivos móviles android. La estructura del programa en App inventor se detalla a continuación en la Figura 29.



```

when ListPicker1 BeforePicking
do set ListPicker1 Elements to BluetoothClient1 AddressesAndNames

when ListPicker1 AfterPicking
do set CONECT Text to ListPicker1 Selection

when CONECTAR Click
do set ListPicker1 Selection to call BluetoothClient1 Connect
address ListPicker1 Selection
set CONECT Text to "CONECTADO"

when ADELANTE Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "A"

when ALTO Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "B"

when ATRAS Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "C"

when IZQUIERDA_GO Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "D"

when IZO_BACK Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "E"

when DERECHA_GO Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "F"

when DER_BACK Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "G"

when Button6 Click
do close application

when Prueba_1 Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "I"

when Prueba_2 Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "J"

when Prueba_3 Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "K"

when Prueba_4 Click
do call BluetoothClient1 SendText
text "L"

```

Figura 29. Consola de control App inventor desde dispositivo móvil. (Diseño del autor)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las señales enviadas desde el dispositivo móvil son captadas por el modulo bluetooth, en este caso es un HC05, el cual envía la información recibida de modo serial al microcontrolador para que realice las tareas correspondientes con los servomotores.

Al presionar las teclas del programa se transmite caracteres en formato ASCII que son decodificados por el PIC y utilizadas para lograr los desplazamientos de la esfera hacia adelante, atrás, adelantar a la derecha, adelantar a la izquierda, retroceder por la derecha, retroceder por la izquierda y las rutinas adicionales que se programen desarrolladas para el microcontrolador PIC están relacionadas en el Apéndice F.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Robot móvil esférico pendular.

Para la realización del prototipo de robot móvil esférico pendular se inició realizando el diseño de las partes y la simulación del móvil utilizando el programa NX 10, se imprimieron las partes necesarias para el ensamble, carcasa central, el péndulo, los bujes, se verificó que las piezas encajaran apropiadamente y se realizó el ensamblado de los dos servomotores para iniciar las pruebas; este sistema utiliza un servomotor truncado con giro de 360 grados para transmitir movimiento a toda la esfera por medio del eje, logrando avance y retroceso, el cambio de dirección se logra por medio de otro servomotor que mueve un péndulo modificando el centro de masa del robot y por ende la dirección de avance, de manera análoga a lo expuesto en Crossley (2006).

Con el fin de verificar el funcionamiento del sistema se probó el robot móvil esférico pendular, mostrado en la Figura 30, en una cancha de fútbol, en piso embaldosado y en una superficie con hierba recortada, al igual que en la muestra de proyectos de aula “ingeniería para la gente” 2016 realizada en la semana de la ingeniería del Instituto Tecnológico Metropolitano, sede Robledo, funcionando durante más de tres horas continuas y comportándose apropiadamente en los tramos rectos y en los cambios de dirección, es de anotar que entre mayor velocidad lleve el móvil y mayor sea el ángulo de giro deseado, se requerirá un espacio más amplio para realizar el cambio de dirección deseado ya que la curva realizada dependerá tanto de la inclinación de la esfera como de su velocidad de desplazamiento



Figura 30. Robot móvil esférico con sistema Pendular (Montaje final)

Por lo anterior para poder realizar un control efectivo de la esfera, se debe procurar definir la velocidad de avance a un valor fijo y modificar únicamente la inclinación del péndulo para los cambios de dirección. Para la transmisión y recepción de las señales de control a la esfera se utilizaron dos módulos Zigbee de comunicación inalámbrica, uno conectado por USB al equipo de cómputo desde el cual se realiza la transmisión de las instrucciones y el otro unido al Arduino Fio de la esfera para controlar los servomotores.

4.2 Trayectoria robot móvil esférico pendular

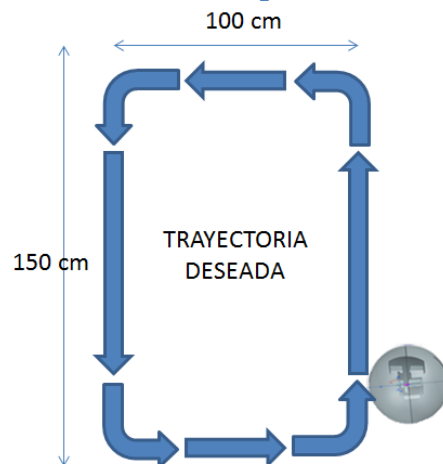


Figura 31. Trayectoria automática deseada con sistema Pendular (Diseño del autor)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con el fin de realizar las pruebas para ejecutar las rutas pregrabadas en el Arduino, se procedió escogiendo un rectángulo de 100 cm por 150 cm, como se observa en la Figura 31 y teniendo en cuenta que el perímetro de la esfera es:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 17,8 \quad P = 55,9 \text{ cm} = \textit{Perimetro esfera}$$

Con cada vuelta de la esfera en línea recta se recorren 55,9 cm.

Enviando al servomotor del péndulo la señal de 78 lo ubicamos en posición central logrando mantener balanceada la esfera, si se envía una señal de 55 se genera en la esfera una inclinación de 20° hacia la izquierda, si enviamos una señal de 92 se producirá una inclinación en la esfera de 20° hacia la derecha.

Con 20 grados de inclinación y una altura de 8,9 (radio esfera), el radio de la circunferencia que realizara la esfera al tomar una curva es de:

$$R = \frac{8,9}{\tan(20)} \quad R = 24,45 \text{ cm} = \textit{Radio circunferencia de curvas}$$

El perímetro de esta curva sería:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 2 * 24,45 \quad P = 153,64 \text{ cm} = \textit{Perimetro circunferencia de curvas}$$

Para girar 90 grados solo requerimos un cuarto del perímetro, por lo tanto:

$$\textit{curva} = 153,64 \text{ cm} / 4 = 38,4 \text{ cm}$$

Con respecto a la esfera y teniendo en cuenta que una revolución (360°) es igual a 2π radianes, esos 38,4cm equivaldrían a:

$$\theta = \frac{s}{R} \quad \theta = \frac{38,4 \text{ cm}}{8,9} \quad \theta = 4,31 \text{ radianes} \quad \theta = 247,2 \text{ grados girados por la esfera}$$

El tiempo que se demora la esfera en dar una vuelta varía de acuerdo a la señal enviada al servomotor, para el avance de la esfera se encontró que:

- Enviando la señal de 89 obtenemos una revolución de retroceso cada 3 segundos
- Enviando la señal de 83 se para la esfera, punto de reposo.
- Enviando la señal de 73 obtenemos una revolución de adelanto cada 3 segundos
- Enviando la señal de 50 obtenemos una revolución de adelanto cada 2 segundos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con el diámetro de la esfera (17,8 cm) y la velocidad angular del servomotor (0,5 rps obtenida con señal de control= 65, periodo T = 2seg.), en este caso se redujo para disminuir los efectos de la inercia y tener mayor control de la trayectoria, se calcula la distancia que puede recorrer la esfera en un periodo de tiempo determinado y con ese parámetro se programa la distancia de avance en las curvas y en las líneas rectas.

- En las curvas:

En 2 segundos la esfera gira 360 grados, para las curvas a 90 grados solo necesito que la esfera gire 247,2 grados, así que el tiempo requerido para que gire la esfera durante las curvas será de:

$$T = \frac{2\text{seg} * 247,2 \text{ grados}}{360 \text{ grados}} \quad T = 1,373 \text{ segundos para dar una curva de } 90 \text{ grados}$$

Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las curvas.

- En las rectas de 100 cm:

Con respecto a la esfera y teniendo en cuenta que una revolución (360°) es igual a 2π radianes y que el radio de la esfera es de 8,9cm, el perímetro de la esfera es de:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 2 * 8,9 \quad P = 55,92\text{cm por cada } 360 \text{ grados de giro de la esfera}$$

$$\theta = \frac{S}{R} \quad \theta = \frac{100\text{cm}}{8,9\text{cm}} \quad \theta = 11,24\text{radianes} \quad \theta = 644$$

644 grados girados por la esfera para lograr avance de 100cm

Como cada 2 segundos la esfera gira 360 grados, para las rectas de 100cm solo necesito 644 grados, así que el tiempo que necesito que gire la esfera durante las rectas de 100cm será de:

$$T = \frac{2\text{seg} * 644 \text{ grados}}{360 \text{ grados}} \quad T = 3,577 \text{ segundos para avanzar } 100\text{cm}$$

Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las rectas de 100cm.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- En las rectas de 150 cm:

Con respecto a la esfera y teniendo en cuenta que una revolución (360°) es igual a 2π radianes y que el radio de la esfera es de 8,9cm, el perímetro de la esfera es de:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 2 * 8,9 \quad P = 55,92cm \text{ por cada } 360 \text{ grados de giro de la esfera}$$

$$\theta = \frac{S}{R} \quad \theta = \frac{150cm}{8,9cm} \quad \theta = 16,854 \text{ radianes} \quad \theta = 965,66$$

965,66 *grados girados por la esfera para lograr avance de 150cm*

Como cada 2 segundos la esfera gira 360 grados, para las rectas de 150cm solo necesito 965,66 grados, así que el tiempo que necesito que gire la esfera durante las rectas de 150cm será de:

$$T = \frac{2seg * 965,66 \text{ grados}}{360 \text{ grados}} \quad T = 5,364 \text{ segundos para avanzar } 150cm$$

Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las rectas de 150cm.

4.3 Robot móvil esférico Bola de Hámster

En el segundo prototipo para su elaboración se procedió de manera similar, pero los dos servomotores del montaje fueron truncados para giro continuo y se gobiernan de modo independiente con el fin de controlar el avance, retroceso y cambio de dirección de la esfera; como sistema de control inalámbrico también se utilizaron módulos Zigbee, encargados de transmitir y recibir las señales de activación, incremento o decremento de la velocidad independiente de cada rueda y parada de los servomotores. Se debe tener en cuenta que para lograr un cambio de dirección en este modelo basta con que exista diferencia de velocidad entre las dos ruedas y que incluso estando detenida la esfera se puede lograr un cambio de dirección ya que este dispositivo posee la ventaja de poder girar sobre su propio eje, similar al diseño planteado por C. E. Merrill en Ylikorpi & Suomela (2007).

Para verificar el funcionamiento del sistema también se realizaron pruebas con el modelo Bola de Hámster mostrado en la Figura 32 en una cancha de futbol, en piso embaldosado

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y en una superficie con hierba recortada, al igual que en la muestra de proyectos de aula “ingeniería para la gente” 2016 realizada en la semana de la ingeniería del Instituto Tecnológico Metropolitano, sede Robledo; también funcionando durante más de tres horas continuas y comportándose apropiadamente tanto en los tramos rectos como en los cambios de dirección, notándose mayor maniobrabilidad al permitir cambios de dirección más rápidos y con menos exigencias de espacio para realizarlos y con la ventaja de poder realizar giros sin necesidad de que existe desplazamiento del vehículo.



Figura 32. Robot móvil esférico con sistema Bola de Hámster (Montaje final)

4.4 Trayectoria robot móvil esférico Bola de Hámster

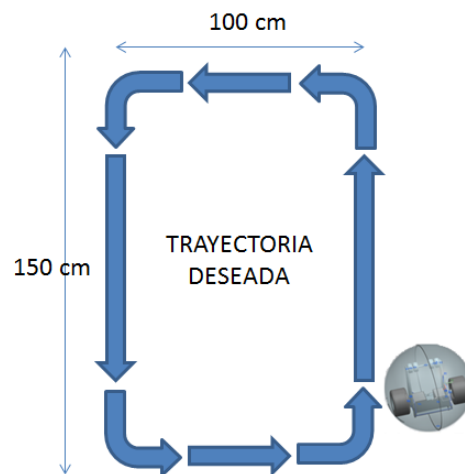


Figura 33. Trayectoria automática deseada con sistema Bola de Hámster (Diseño del autor)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con el fin de realizar las pruebas para ejecutar las rutas pregrabadas en el Arduino, se procedió escogiendo un rectángulo de 100 cm por 150 cm, como se observa en la Figura 33 y teniendo en cuenta que la esfera tiene un perímetro de:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 17,8 \quad P = 55,9 \text{ cm} = \textit{Perimetro esfera}$$

Con cada vuelta de la esfera, en línea recta, se recorren 55,9 cm

Enviando a los servomotores la señal de A+S se realiza el desplazamiento hacia adelante de la esfera

Enviando al servomotor izquierdo la señal de A y al servomotor derecho la señal X generamos un giro sobre su propio eje hacia la derecha a 90 grados de la trayectoria de la esfera en 4 segundos

Enviando al servomotor izquierdo la señal de Z y al servomotor derecho la señal S generamos un giro sobre su propio eje hacia la izquierda a 90 grados de la trayectoria de la esfera en 4 segundos

Con respecto a la esfera y teniendo en cuenta que una revolución (360°) es igual a 2π radianes, el tiempo que se demora la esfera en dar una vuelta varía de acuerdo a la señal enviada al servomotor, para el avance de la esfera se encontró que:

Utilizando los comandos A+S la esfera da una revolución hacia adelante de 360 grados en 8 segundos.

Utilizando los comandos Z+X la esfera da una revolución hacia atrás de 360 grados en 8 segundos.

Con el diámetro de la esfera (17,8 cm) y la velocidad angular de la esfera (0,125 rps, o su equivalente 6,99 cm/seg), en este caso se redujo para disminuir los efectos de la inercia y tener mayor control de la trayectoria, se calcula la distancia que puede recorrer la esfera en un periodo de tiempo determinado y con ese parámetro se programa la distancia de avance en las curvas y en las líneas rectas.

- En las rectas de 100 cm:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Teniendo en cuenta que una revolución de la esfera (360°) es igual a 2π radianes y que el radio de la esfera es de 8,9cm, el perímetro de la esfera es de:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 2 * 8,9 \quad P = 55,92cm \text{ por cada } 360 \text{ grados de giro de la esfera}$$

$$\theta = \frac{S}{R} \quad \theta = \frac{100cm}{8,9} \quad \theta = 11,24radianes \quad \theta = 644$$

644 grados girados por la esfera para lograr avance de 100cm

Como cada 8 segundos la esfera gira 360 grados, para las rectas de 100cm solo necesito 644 grados, así que el tiempo que necesito que gire la esfera durante las rectas de 100cm será de:

$$T = \frac{8seg * 644 \text{ grados}}{360 \text{ grados}} \quad T = 14,31 \text{ segundos para avanzar } 100cm$$

Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las rectas de 100cm.

- En las rectas de 150 cm:

Con respecto a la esfera y teniendo en cuenta que una revolución (360°) es igual a 2π radianes y que el radio de la esfera es de 8,9cm, el perímetro de la esfera es de:

$$P = \pi d \quad P = \pi * 2 * 8,9 \quad P = 55,92cm \text{ por cada } 360 \text{ grados de giro de la esfera}$$

$$\theta = \frac{S}{R} \quad \theta = \frac{150cm}{8,9} \quad \theta = 16,854 \text{ radianes} \quad \theta = 965,66$$

965,66 grados girados por la esfera para lograr avance de 150cm

Como cada 8 segundos la esfera gira 360 grados, para las rectas de 150cm solo necesito 965,66 grados, así que el tiempo que necesito que gire la esfera durante las rectas de 150cm será de:

$$T = \frac{8seg * 965,66 \text{ grados}}{360 \text{ grados}} \quad T = 21,46 \text{ segundos para avanzar } 150cm$$

Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las rectas de 150cm.

- En las curvas:

En 4 segundos el mecanismo interno del robot esfera gira 90 grados sobre su propio eje, Ese valor de tiempo se cargara al Arduino en la duración de las curvas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.5 Robot móvil esférico tipo Pendular Modificado

Para la elaboración del tercer prototipo se procedió de manera similar a los dos casos anteriores en cuanto a diseño y ensamble de la parte mecánica, con un servomotor truncado para giro continuo que proporciona avance y retroceso desde el eje principal de la esfera y otro servomotor convencional de 180 grados para lograr el cambio de dirección por transferencia del centro de masa logrado mediante el mecanismo de piñón-cremallera; ambos servos son gobernados de modo independiente. Como sistema de control inalámbrico se utilizó un módulo bluetooth HC05, encargado de recibir las señales de activación de cada uno de los servomotores; el presente mecanismo funciona de forma similar a la pendular mostrada en Crossley (2006), pero con la diferencia de que el cambio de centro de masa se logra por transferencia de contrapesos paralelos al eje principal y no por cambio de la posición angular de un péndulo.

Para verificar el funcionamiento del sistema también se realizaron pruebas con el modelo Pendular Modificado, mostrado en la Figura 32, en una cancha de futbol y en piso embaldosado, encontrando que al tener todo el centro de masa ubicado sobre el eje de rotación de la esfera presentaba dificultades para iniciar el desplazamiento, ya que en lugar de rotar el cuerpo de la esfera hacia adelante se producía rotación de toda la estructura interna en dirección contraria; para corregir este efecto se adiciono mayor peso en la parte inferior de la estructura, logrando que la parte interna se quedara estática y por lo tanto ocasionando que la esfera iniciara rotación y normal desplazamiento hacia adelante y hacia atrás; desafortunadamente al tener restringido el centro de masa de la esfera a la estructura interna del mecanismo, a pesar de lograr normal desplazamiento hacia adelante y hacia atrás, cuando se cambia la dirección de desplazamiento a derecha o izquierda se presenta un movimiento oscilatorio irregular que desestabiliza la esfera y altera la realización de la trayectoria deseada.

Una posible solución para este inconveniente seria la modificación de la estructura interna adicionando una plataforma similar al péndulo, en la cual se coloque peso suficiente para estabilizar el centro de masa de la esfera y garantizar que este nuevo elemento se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

desplace de forma paralela a la curvatura interna de la esfera cuando se utilice el sistema de piñón cremallera en las realización de las curvas.



Figura 32. Robot móvil esférico con sistema Pendular Modificado (Montaje final)

Teniendo en cuenta que el principio de funcionamiento y dimensiones externas son similares al prototipo pendular, los cálculos realizados en el primer caso podrían aplicar a este modelo, siempre y cuando se realicen los ajustes necesarios a la plataforma interna para brindar estabilidad en las curvas, como se expuso anteriormente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se diseñaron, implementaron y validaron tres diferentes modelos de robots móviles que realizan su desplazamiento sin que sus ruedas o sistema mecánico estén en contacto directo con la superficie por la cual se mueve, de modo que pueden cambiar de superficie lisa, hierba y arena sin inconvenientes, encontrando que el modelo Bola de Hámster es más eficiente en cuanto a maniobrabilidad en entornos similares y con características cercanas de velocidad, fuerza, peso y costo
- Se elaboró, implemento y verifíco el funcionamiento de un robot móvil esférico con sistema pendular en el cual avanza y retrocede con la ayuda de un servomotor y al cambiar el centro de gravedad del móvil por medio del péndulo modifica la dirección de avance o giro del robot.
- Se elaboró, implemento y verifíco el funcionamiento de un robot móvil esférico con sistema Bola de Hámster el cual utiliza dos ruedas con motores independientes las cuales permanecerán en contacto con la parte interior de la esfera y realizaran los movimientos de avance, retroceso y cambios de giro de acuerdo a la activación individual o simultanea de los motores.
- Se elaboró, implemento y verifíco el funcionamiento de un robot móvil esférico con sistema pendular modificado, el cual para el cambio de dirección utiliza un mecanismo de piñón-cremallera que permite la transferencia de un contrapeso a lo largo del eje de avance, el cual cambia el centro de gravedad de la esfera y por lo tanto la dirección de avance o giro del robot.
- Las plataformas robóticas móviles encapsuladas en esferas, por su diseño, permiten adaptarse a los cambios de terreno facilitando su utilización en la industria para realizar actividades monótonas o riesgosas de inspección y vigilancia, monitoreo en

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

espacios reducidos, desplazarse a pesar de algunos cambios de superficie (solida rígida, arena, pasto, líquida, etc.)

- En el ámbito académico el desarrollo de sistemas mecatrónicos no convencionales es útil para estimular la creatividad, imaginación e investigación en los estudiantes con el fin de que se realicen a futuro desarrollos de modelos alternativos de desplazamiento en los sistemas robóticos móviles, al igual que la implementación de dispositivos para sensorica, actuadores y control.
- Para un mayor aprovechamiento de los modelos planteados en el presente proyecto se requiere mayor investigación y desarrollo en las áreas de sensorica en especial la implementación de compas magnético, acelerómetros triaxiales, giroscopios, sistemas de recarga de baterías de modo inalámbrico, encoders, actuadores y sistemas automáticos de control para trayectorias.
- Queda pendiente para trabajo futuro el desarrollo matemático de la cinemática y dinámica de cada uno de los prototipos implementados en el presente proyecto, la implementación del método de control automático más apropiado para cada caso y la adaptación de la carcasa por una que permita el sellado e impermeabilización con el fin de realizar las pruebas en superficies líquidas.
- Es indispensable para lograr una estabilización tanto en trayectorias rectas como curvas, que el robot móvil esférico posea un centro de masa lo más bajo posible y que pueda desplazarse paralelamente a la cara interior de la esfera, ya que esta configuración ayuda a que se produzca el avance y retroceso desde cero con mayor facilidad y a lograr un movimiento fluido y constante en las curvas.
- Para la generación de retardos en la plataforma Arduino debe procurarse no utilizar la instrucción delay, ya que el procesador no puede atender ninguna otra instrucción mientras atiende los retardos generados con este método, por lo cual se sugiere la utilización de las instrucciones millis() y las librerías MsTimer2.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

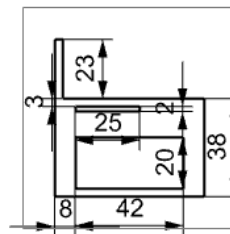
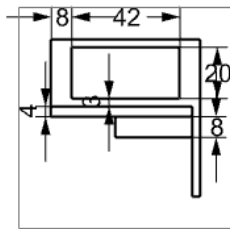
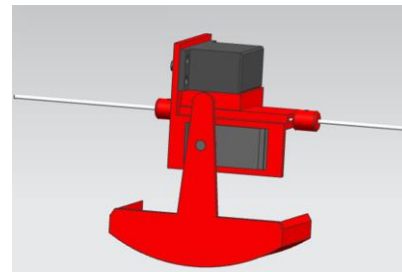
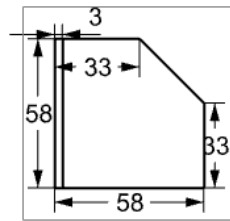
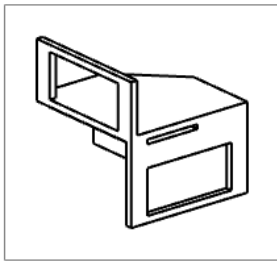
- Ahn, S. S., Kim, Y. M., & Lee, Y. J. (2010). A deformable spherical robot with two arms. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 16(11), 1060–1067.
<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2010.16.11.1060>
- Bañó, A. A. (2003). Análisis y Diseño del Control de Posición de un Robot Móvil con Tracción Diferencial. *Escola Tecnica Superior Enginyeria*, 167.
- Crossley, V. (2006). A literature review on the design of spherical rolling robots. *Pittsburgh, PA*, 1–6. Retrieved from
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.4193&rep=rep1&type=pdf>
- García, J. F. C. (2010). Análisis Cinemático, dinámico y Control en Tiempo Real de un Vehículo Guiado Automáticamente, 41.
- Grisales Ramírez, E. (2013). Control de un robot móvil en entornos domésticos, 99. Retrieved from
<http://www.bdigital.unal.edu.co/12164/>
- Joshi, V. A., Banavar, R. N., & Hippalgaonkar, R. (2010). Design and analysis of a spherical mobile robot. *Mechanism and Machine Theory*, 45(2), 130–136.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2009.04.003>
- La, A. P. D. E., Odométrica, E., V, J. A. V., & O, A. M. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica., (41).
- Schroll, G. C. (2010). Dynamic model of a spherical robot from first principles, 105.
- Tecnol, P., & Ochoa, S. (n.d.). Resumen.
- Ylikorpi, T., & Suomela, J. (2007). Ball-shaped robots. *Climbing & Walking Robots, Towards New Applications*, (October), 546. Retrieved from http://cdn.intechopen.com/pdfs/478/InTech-Ball_shaped_robots.pdf
http://cdn.intechopen.com/pdfs/478/InTech-Ball_shaped_robots.pdf

APÉNDICE

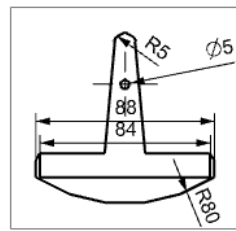
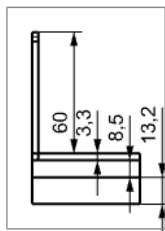
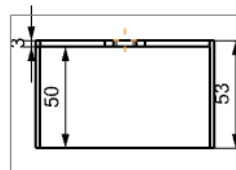
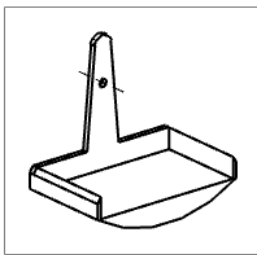
Apéndice A

Plano estructura interna Prototipo Pendular

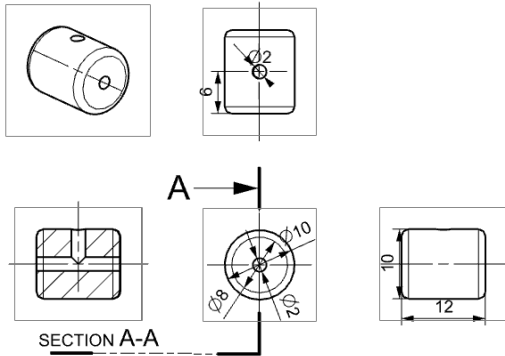
Soporte central:



Péndulo:



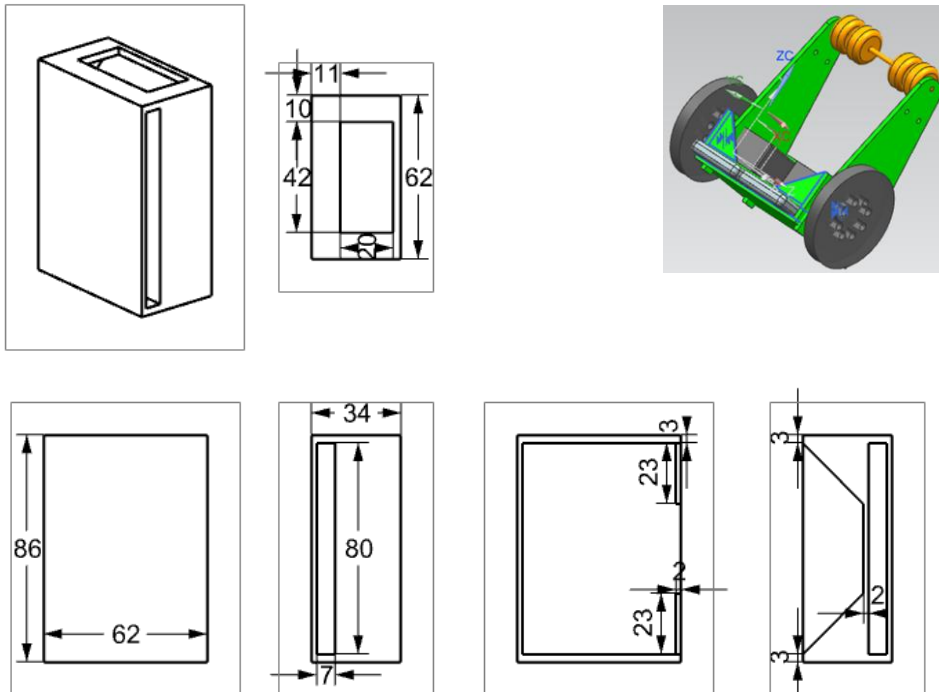
Buje:



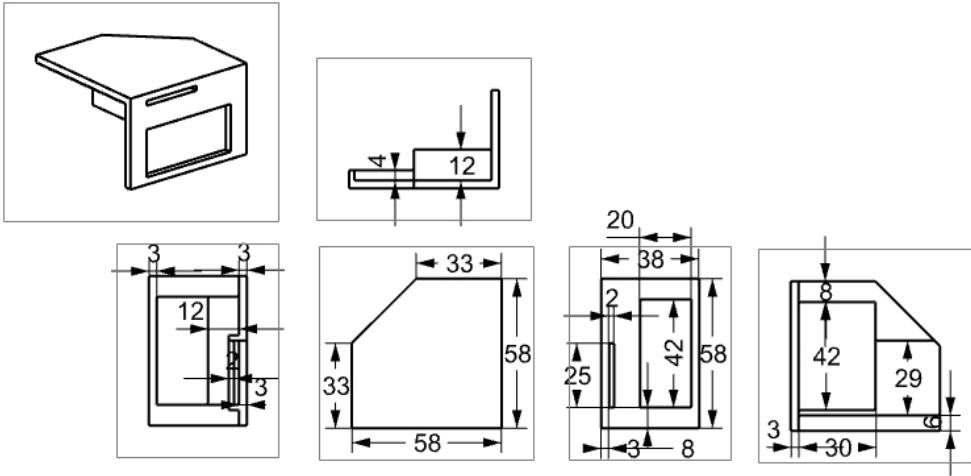
Apéndice B

Plano estructura interna Prototipo Bola de Hámster

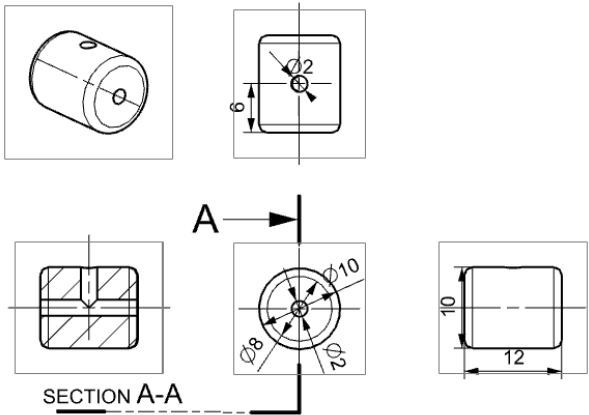
Soporte central:



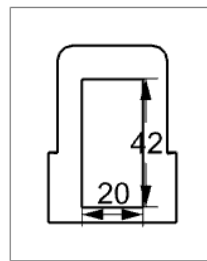
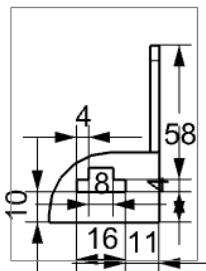
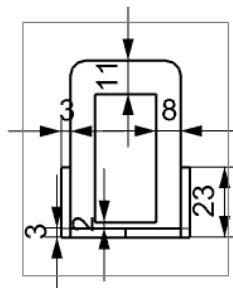
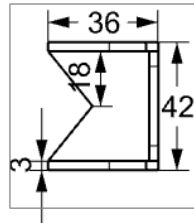
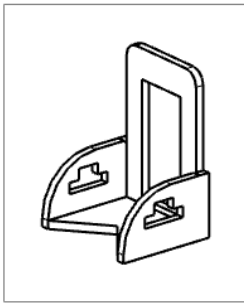
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



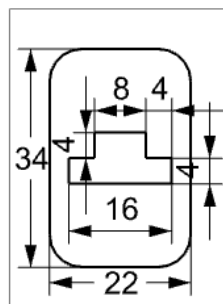
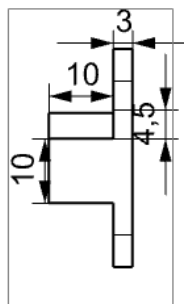
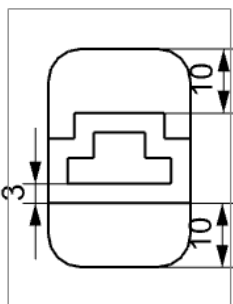
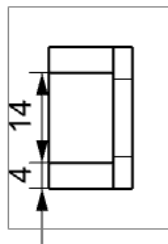
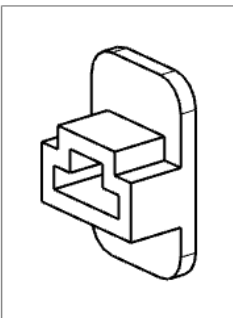
Bujes:



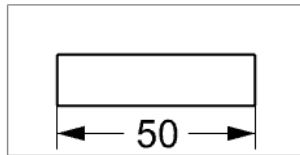
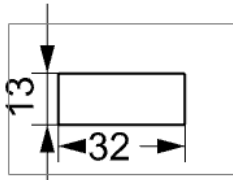
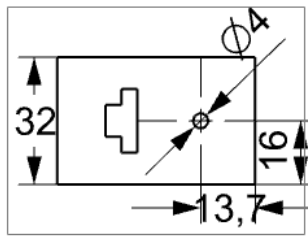
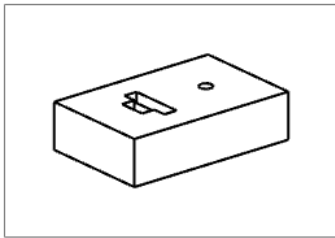
Soporte inferior:



Soporte cremallera:



Guía cremallera:



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


 FIRMA ESTUDIANTES

FIRMA ASESOR **JUAN SE.**

FECHA ENTREGA: 01/12/2016

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____