

Trabajo de Diploma

Autor: José Antonio Barroso Rojas

Tutor: MSc. Ing. David Díaz Martínez

Santiago de Cuba

2017



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Control Automático

Trabajo de Diploma

Título: Robot auto-balanceado de dos ruedas con Arduino.

Autor: José Antonio Barroso Rojas

Tutor: MSc. Ing. David Díaz Martínez

Santiago de Cuba

2017

DEDICATORIA

A mi hermano José Luis, que, aunque no lo creas, eres la persona más importante en mi vida. Espero poder servirte de amigo y de ejemplo de que, si quieres algo en la vida, no hay camino fácil, tienes que luchar por ello hasta alcanzarlo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su amor, apoyo incondicional, haber creído en mí y siempre estar cuando los necesitaba.

A mi abuelo Deli por ser la persona que más me ha aconsejado y consentido a la vez.

A mi abuela Migdalia porque siempre ha cuidado de mí y me ha dado todo su amor.

A mi novia por su amor y apoyo desde que la conocí.

A mi cuñada y mis suegros por dejarme ser parte de su familia y ayudarme.

A mi tutor M.Sc. Ing. David Díaz Martínez por todo el empeño y ayuda para que este proyecto se hiciera realidad.

A mi tío Jesús, mi tía Damaris, mi abuelo Barroso, mi tía Elizabeth, Iveth y mi primo Ernesto.

A Rubiel y Mila por brindarme su ayuda en cualquier momento que la necesitaba.

A Gladis que ha sido otra abuela para mí.

A Julio y a Gili que han sido como unos hermanos mí.

A todo el Combo del 157 (Ortega, Mayito, Carlito, Osorio, Alejandro, Richar, Carlo), a Joel, Noel, Martín, Euler, Félix, Sony, Lumber, Nico, Rober, el Calvin y el Niño por hacer que la Universidad fuera tan divertida que llegué a considerarla mi segunda casa.

A mis vecinos Evelio, Teresa, Cary, Dega y Edgar.

A todas esas personas que me brindaron su ayuda cuando lo necesité.

Pensamiento

Las puertas de la sabiduría nunca están cerradas.

Franklin

RESUMEN

En los últimos años, la tecnología cada vez está más presente en las vidas cotidianas de las personas. Esto ha provocado que la robótica asuma un papel muy importante, no solo en la industria, sino también a nivel particular. La robótica es uno de los pilares más importantes y complicados de la ingeniería, donde múltiples disciplinas aportan su granito de arena para llevar a cabo un proyecto muy ambicioso. Además, gracias a esta cooperación surgen soluciones a distintos problemas que, de manera individual, se podrán utilizar en un futuro para otras aplicaciones. Debido a las ventajas que vienen con un diseño de dos ruedas auto-equilibrado, una serie de productos de consumo se han convertido recientemente en tendencias utilizados para el propósito de transporte humano.

En el presente trabajo se diseña e implementa un robot de balanceo de dos ruedas vertical y auto-equilibrado que utiliza una Unidad de Medida Inercial y un controlador PID para mantener la estabilidad. Se implementa un microcontrolador adecuado para estabilizar el robot. Se utilizan dos tipos de sensores para proporcionar información de inclinación (acelerómetro y giroscopio) y el movimiento se realiza a través de motores de CD. Básicamente el robot lucha por mantenerse en vertical; cuando el sensor detecta una variación en el ángulo ideal (*setpoint*), los motores reaccionan moviéndose hacia esa dirección evitando la caída (el principio básico de un péndulo invertido), para lograrlo el controlador PID gobierna la salida hacia los motores de CD. Se apalanca esta caída moviendo continuamente las ruedas debajo del vehículo cuando cae. Si se inclina hacia delante, las ruedas giran hacia adelante para contrarrestar la caída.

El trabajo contiene una discusión exhaustiva del sistema, incluyendo detalles sobre diseño, construcción, mecánica, la electrónica, software, y pruebas realizadas sobre el robot de auto-equilibrio.

ABSTRACT

In recent years, technology is increasingly present in people's daily lives. This has led to robotics assuming a very important role, not only in the industry, but also at particular level. Robotics is one of the most important and complicated fields of engineering, where multiple disciplines contribute to carry out a very ambitious project. In addition, thanks to this cooperation arise solutions to different problems that, individually, may be used in the future for other applications. Due to the advantages that come with a self-balanced two-wheeled design, a number of consumer products have recently become trends used for the purpose of human transportation.

In the present work, a vertical and self-balanced two-wheel balancing robot is designed and implemented that uses an Inertial Measurement Unit and a PID controller to maintain stability. A suitable microcontroller is implemented to stabilize the robot. Two types of sensors are used to provide tilt information (accelerometer and gyroscope) and movement is performed through CD motors. Basically the robot struggles to stay vertical; when the sensor detects a variation in the ideal angle (setpoint), the motors react by moving in that direction avoiding the fall (the basic principle of an inverted pendulum), to achieve this the PID controller governs the output to CD motors. This fall is leveraged by continuously moving the wheels under the vehicle when it falls. If the robot lean forward, the wheels rotate forward to counteract the fall.

The work contains an exhaustive discussion of the system, including details on design, construction, mechanics, electronics, software, and tests performed on the self-balancing robot.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. Péndulo invertido en la robótica móvil.....	6
Introducción.....	6
1.1 Origen de la palabra robot y su significado.....	6
1.2 Cronograma sobre la historia de la robótica.	7
1.3 Robótica móvil.....	10
1.3.1 Tipos de robots móviles.....	13
1.3.2 Robots móviles con ruedas.....	14
1.4 Tipos de ruedas.....	14
1.5 Clasificación de los robots según su configuración.....	15
1.6 Péndulo invertido.....	18
1.6.1 Historia del péndulo invertido.....	19
1.6.2 Desarrollo en el campo de los robots auto-balaceados.	21
1.6.2.1 Robots para servicio.	21
1.6.2.2 Robots para transporte.....	22
1.6.2.3 Robots para uso didáctico o entretenimiento.....	23
1.7 Plataforma Arduino.....	24
1.7.1 Historia de la plataforma de Arduino.....	25
1.8 Motores.	27
1.8.1 Motores de CD (Corriente Directa).	27
1.8.2 Servomotores.	28
1.8.3 Motores Paso a Paso.	29
Conclusiones Parciales.	30
CAPÍTULO 2. Construcción y puesta en marcha del robot balancín..	31
Introducción.....	31
2.1 Concepción general de robot balancín.	31
2.2 Modelado Matemático del Péndulo Invertido.	33
2.2.1. Análisis de las fuerzas y sistema de ecuaciones	34
2.2.2 Función de transferencia.	36
2.3 Descripción de los sensores y actuadores del sistema.....	37
2.3.1 Sensor de inclinación.....	37

2.3.1.1 Acelerómetro ADXL345.....	38
2.3.1.2 Giroscopio ITG3200.	40
2.3.2 Tarjeta Electrónica Arduino UNO.....	41
2.3.3 Motor Shield (L298N).....	42
2.3.4 Mecanismo Motor-Reductor-Rueda.	44
2.4 Estrategia para medición combinada del ángulo.	46
2.4.1 Filtro complementario.	47
2.5 Control PID.	49
2.5.1 Sintonización manual del controlador.	51
2.6 Resultado final y pruebas experimentales.	51
2.7 Análisis Económico.	54
Conclusiones parciales.....	55
CONCLUSIONES.....	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFIA	58
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre ha tratado de mejorar su calidad de vida mediante la tecnología. Históricamente, la tecnología se ha enfocado en conseguir un aumento de la productividad en las empresas. Pero en los últimos años, cada vez está más presente en la vida cotidiana de las personas. Esto ha provocado un aumento del interés por automatizar y facilitar, no sólo el sector empresarial, sino también el sector de servicios. El campo de la robótica ha crecido enormemente con todas estas necesidades. Este campo ha dominado las mentes de las personas de todo el mundo. El sueño de muchos seres humanos es crear una máquina que los reproduzca en todos los aspectos de la vida cotidiana. El desarrollo en este campo durante un par de décadas ha transformado los sueños en realidad. La influencia de la robótica en la sociedad actual es cada vez más notable, tanto desde el punto de vista estrictamente social como a los aspectos económicos e industriales. Como consecuencia, la investigación y desarrollo en este campo es de vital importancia.

En la actualidad, debido al auge de otras ramas de las ciencias como la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, la robótica ha experimentado un vertiginoso desarrollo. El uso de microcontroladores eficientes y sensores sensibles ha ayudado mucho en lograr este hito. Así, hoy en día podemos encontrar los más disímiles tipos de robots llevando a cabo diversas tareas. Ahora los robots se pueden ver en nuestra vida diaria. Entre ellos destacan por su gran capacidad de desplazamiento los robots móviles. Los robots móviles cubren una gran variedad de campos, entre los cuales se incluyen trabajos subterráneos, tareas submarinas, misiones espaciales, en líneas de producción en fábricas, exploración planetaria, vigilancia e intervención de seguridad, desactivación de explosivos, operación en zonas radioactivas, aplicaciones militares o como productos comerciales. En todas estas áreas la justificación más importante para el uso de la robótica es la dificultad o imposibilidad de intervención humana, bien directa o teleoperada. Los robots móviles se encuentran también en la industria y los servicios, son productos de consumo domésticos que realizan ciertas tareas como pasar la aspiradora o la jardinería, incluyendo robots de entretenimiento.

Los robots móviles por ruedas son una opción viable en cuanto a economía y construcción. Potencialmente los robots con patas pueden superar con mayor facilidad los problemas de los terrenos irregulares pero su construcción plantea numerosos retos que se originan principalmente en el gran número de grados de libertad que requieren. Cada pata necesita como mínimo un par de motores lo que produce un mayor coste, así como una mayor complejidad y menor fiabilidad, es más, los algoritmos de control se vuelven mucho más complicados por el gran número de movimientos a coordinar, los sistemas de patas son un área de investigación muy activa.

Una de las principales diferencias que hay que destacar de los robots, refiriéndonos a la mecánica, es su tipo de estabilidad: estática o dinámica. Un robot es de estabilidad estática cuando su funcionamiento no afecta a su centro de gravedad. Este es el caso de los robots que se desplazan mediante más de dos ruedas. Un rápido vistazo a la gama de robots móviles en existencia revela una enorme diversidad en forma, forma y modos de movilidad. Sin embargo, una cosa que la mayoría de ellos tienen en común es que están pasivamente equilibrados (es decir, sus cuerpos están constantemente en un estado de equilibrio estable). Si bien esto es perfectamente lógico en la mayoría de los casos, hay ciertas aplicaciones, tales como *Segways* y robots humanoides, que se aprovechan de un equilibrio inestable, diseño de péndulo invertido para mejorar sus capacidades. Aunque sus mecanismos de auto-equilibrio pueden aumentar la complejidad de su diseño, los beneficios, que incluyen una mayor maniobrabilidad y estabilidad, superan los costos.

En este trabajo se ha apostado por el estudio de robots de estabilidad dinámica los cuales son más complicados desde el punto de vista del diseño y del control, pero ofrecen ventajas muy importantes frente a los de estabilidad estática como la capacidad de sortear obstáculos más complicados como subir escaleras o atravesar una pila de escombros, mejor adaptación al entorno y maniobrabilidad en espacios estrechos, etc.

El robot auto-equilibrado de dos ruedas es también un campo en desarrollo dentro de la robótica. Este se basa en el concepto de la teoría del péndulo invertido. Este tipo de robot ha ganado fama e interés entre los investigadores y los ingenieros, ya

que utiliza un sistema de control para estabilizar un sistema inestable utilizando microcontroladores y sensores eficientes. Los robots de balanceo de dos ruedas se pueden utilizar en varias aplicaciones con diferentes perspectivas, como carros autónomos en hospitales, centros comerciales, oficinas, aeropuertos, aplicaciones sanitarias o un robot inteligente para guiar a personas ciegas o discapacitadas. Estos tipos de robots pueden trabajar eficazmente en superficies no uniformes debido a su sistema de control equilibrado.

El diseño de dos ruedas del autotransporte *Segway Personal Transporter* aumenta significativamente su maniobrabilidad, ya que reduce el radio de giro a cero. El vehículo puede girar en su lugar para cambiar instantáneamente su dirección de movimiento y navegar con precisión en espacios estrechos que un robot de tres o cuatro ruedas no puede. Además, mientras un sistema de equilibrio equilibrado y equilibrado pasivamente se puede inclinar sobre el instante en que se pone fuera de balance, un equilibrio activo, un sistema de equilibrio inestable como el *Segway* puede tomar medidas para recuperarse si su equilibrio es perturbado temporalmente. Este comportamiento que mejora la estabilidad imita directamente el comportamiento natural de un ser humano que evita una caída al dar un paso en la dirección del movimiento.

Un robot auto-balanceado péndulo invertido no es más que un péndulo con su centro de masa por encima del punto de pivote. Equilibrar un péndulo invertido es un desafío, porque es inherentemente inestable. La menor perturbación de la posición de equilibrio resulta en una fuerza alejada del equilibrio que desestabiliza aún más el sistema. Por lo tanto, mantener el equilibrio en un equilibrio inestable requiere un control preciso y de baja latencia para corregir instantáneamente cualquier error de inclinación en el instante en que sucede. Es un clásico problema de control que se puede resolver en dos grados de libertad para los modelos más simples. Convenientemente, el centro de gravedad alto crea un gran momento de inercia que disminuye la velocidad a la que caerá. El vehículo intenta corregir un ángulo de inclinación inducido moviéndose hacia adelante o hacia atrás, y el objetivo es volver a sí mismo a la vertical. La física de este robot es simple, el robot se coloca en dos puntos alineados, la rueda, y tiende a caer y perder su verticalidad, el movimiento de la rueda en la dirección de la caída levanta el robot para recuperar

la posición vertical. Para ello, el controlador debe tomar las mediciones del ángulo de inclinación (*Roll*) que tiene el vehículo, procedentes de los sensores, y controlar los motores para ir hacia adelante o hacia atrás para hacer ese ángulo 0, manteniendo su verticalidad. Se evitará que se caiga dando aceleración a las ruedas según su inclinación desde la vertical. Si el robot se inclina por un ángulo, el centro de masa del robot experimentará una pseudo fuerza que aplicará un par opuesto a la dirección de inclinación.

En general el costo de estas plataformas comerciales es alto, en el orden de los miles de dólares, quedando fuera del alcance de muchas universidades y centros de investigación, por lo que es común el desarrollo de plataformas propias a un costo moderado, a partir de componentes disponibles en el mercado para este fin. Por otro lado, el disponer de una plataforma abierta, a un costo razonable, tanto a niveles de hardware como de software, facilita el desarrollo, mantenimiento, futura expansión de estos sistemas y a la vez estimula el desarrollo académico y afianzamiento de los conocimientos.

Estas plataformas robóticas pueden llegar a ser sencillas y flexibles en su arquitectura, hechas con materiales simples y al alcance, permitiendo así constantes cambios de hardware, probar diferentes técnicas de control, experimentar con distintos sensores, probar algoritmos de navegación, en general, son un modelo real donde poner en práctica conocimientos adquiridos de forma teórica. Son utilizados con frecuencia para la enseñanza multidisciplinaria en escuelas y la investigación científica en universidades. La robótica abarca muchas áreas de interés como mecánica, electrónica, física, computación, automática, entre otras, las cuales hacen de esta una herramienta versátil para la docencia y la investigación. Cada universidad técnica debería contar con uno o más laboratorios que se centren en su estudio.

La Universidad de Oriente no es la excepción, desde hace algunos años se ha venido introduciendo la asignatura de robótica dentro del plan de estudios de la Carrera de Automática y cada año son más los trabajos y avances que se hacen relacionados con robots, como son los manipuladores, seguidores de línea, guiados mediante navegación odométrica, etc., Es muy importante contar con plataformas robóticas que permitan a los estudiantes un acercamiento a estos temas, desde los

primeros años. Pero hasta el momento ha sido casi nulo el trabajo que se ha hecho en el área de los robots auto-balanceados tipo péndulo invertido.

En base a lo antes expuesto, para la realización de este trabajo se plantea como **problema de la investigación** la necesidad de introducir el estudio de los péndulos invertidos en la asignatura de Robótica en la carrera Automática. Para ello se define como **objeto de la investigación** los robots móviles tipo péndulo invertido. El **objetivo** es diseñar y construir un robot péndulo invertido para la enseñanza de la asignatura Robótica en la Carrera Automática. Es por esto que el **campo de acción** es los péndulos invertidos usando la plataforma Arduino. Para ello se plantea como **hipótesis** que, si se diseña e implementa un robot tipo péndulo invertido usando la plataforma Arduino, se estaría dotando al Departamento de Automática de los medios y el conocimiento necesarios para la enseñanza de estos temas avanzados dentro de la robótica y se elevaría el nivel científico de los estudiantes de pre y postgrado. Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes tareas de investigación:

1. Analizar el principio de físico de trabajo de los principales componentes utilizados en la confección del robot.
2. Analizar las características y modos de programación de la plataforma Arduino para el control del robot.
3. Realizar el montaje, programación y pruebas experimentales de funcionamiento del dispositivo.
4. Analizar los resultados y emitir conclusiones.

CAPÍTULO 1. Péndulo invertido en la robótica móvil.

Introducción.

En este capítulo se realiza un estudio de los principales aspectos de la robótica en general, de la robótica móvil y en los robots tipo péndulo invertido sobre dos ruedas, haciéndose énfasis en estos últimos ya que ocupan el interés del presente trabajo, así como las aplicaciones a las cual se destinan los robots con este tipo de desplazamiento. Por último, se describen los principales actuadores eléctricos, en específico los que se emplean en esta tesis.

1.1 Origen de la palabra robot y su significado.

La primera vez que se habló de estos seres utilizando el término por el que es hoy mundialmente conocido; robot, fue en una obra checoslovaca publicada en 1917 por Karel Kapek, en la que dio lugar al término robot, y se propagó a partir de 1920 por medio de su famosa obra teatral RUR (*Rossum's Universal Robots*). En esta obra Kapek habla de la deshumanización del hombre en un medio tecnológico; a diferencia de los robots actuales, éstos no eran de origen mecánico, sino más bien creados a través de medios químicos, terminan por no cumplir con su papel de servidores y se rebelan contra sus dueños. La palabra checa 'Robot' significa servidumbre o trabajador forzado.

Entre los escritores de ciencia ficción, Isaac Asimov contribuyó con varias narraciones relativas a robots. Comenzó en 1939, a él se atribuye el acuñamiento del término Robótica. La imagen de robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios. Estos principios fueron denominados por Asimov las Tres Leyes de la Robótica, y son:

1. Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante la inacción, que un ser humano sufra daños.
2. Un robot debe de obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflictos con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

Consecuentemente todos los robots de Asimov son fieles sirvientes del ser humano, de esta forma su actitud contraviene a la de Kapek.

Hoy la palabra robot tiene diferentes significados: Para el *Robot Institute of América*, un robot es “un manipulador multifuncional y reprogramable, diseñado para mover materiales piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos programables y variables que permitan llevar a cabo diversas tareas”. Y según el *Oxford English Dictionary*: un robot es “un aparato mecánico que se parece y hace el trabajo de un ser humano”.

Una definición más funcional y acorde al panorama tecnológico actual expone a los robots como dispositivos compuestos de sensores que reciben datos de entrada y que pueden estar conectados a la computadora. Ésta, al recibir la información de entrada, ordena al robot que efectúe una determinada acción. Puede ser que los propios robots dispongan de microprocesadores que reciben la entrada de los sensores y que estos microprocesadores ordenen al robot la ejecución de las acciones para las cuales está concebido. En este último caso, el propio robot es a su vez una computadora.

1.2 Cronograma sobre la historia de la robótica.

En la **Tabla 1.1** se muestra un resumen de la evolución de algunos de los principales avances de la robótica desde sus inicios hasta nuestros días (*Borbón, Rojas, & Viquez, 2003*).

Tabla 1.1: Cronograma sobre la historia de la robótica.

FECHA	DESARROLLO
Siglo XVIII.	A mediados del siglo J. de Vaucanson construyó varias muñecas mecánicas de tamaño humano que ejecutaban piezas de música.
1801	J. Jacquard inventó su telar, que era una máquina programable para la urdimbre.
1805	H. Maillardet construyó una muñeca mecánica capaz de hacer dibujos.
1946	El inventor americano G.C. Devol desarrolló un dispositivo controlador que podía registrar señales eléctricas por medios magnéticos y

	reproducirlas para accionar una máquina mecánica. La patente estadounidense se emitió en 1952.
1951	Trabajo de desarrollo con teleoperadores (manipuladores de control remoto) para manejar materiales radiactivos. Patente de Estados Unidos emitidas para Goertz (1954) y Bergsland (1958).
1952	Una máquina prototipo de control numérico fue objetivo de demostración en el Instituto Tecnológico de Massachusetts después de varios años de desarrollo. Un lenguaje de programación de piezas denominado APT (<i>Automatically Programmed Tooling</i>) se desarrolló posteriormente y se publicó en 1961.
1954	El inventor británico C. W. Kenward solicitó su patente para diseño de robot. Patente británica emitida en 1957.
1954	G.C. Devol desarrolla diseños para transferencia de artículos programada. Patente emitida en Estados Unidos para el diseño en 1961.
1959	Se introdujo el primer robot comercial por Planet Corporation. Estaba controlado por interruptores de fin de carrera.
1960	Se introdujo el primer robot "Unimate", basado en la transferencia programada de artículos de Devol. Utilizan los principios de control numérico para el control de manipulador y era un robot de transmisión hidráulica.
1961	Un robot Unimate se instaló en la Ford Motors Company para atender una máquina de fundición de troquel.
1966	Trallfa, una firma noruega, construyó e instaló un robot de pintura por pulverización.
1968	Un robot móvil llamado "Shakey" se desarrolló en SRI (<i>Space Research Institute</i>), estaba provisto de una diversidad de sensores así como una cámara de visión y sensores táctiles y podía desplazarse por el suelo.
1971	El "Standford Arm", un pequeño brazo de robot de accionamiento eléctrico, se desarrolló en la Standford University.
1973	Se desarrolló en SRI el primer lenguaje de programación de robots del tipo de computadora para la investigación con la denominación

	WAVE. Fue seguido por el lenguaje AL en 1974. Los dos lenguajes se desarrollaron posteriormente en el lenguaje VAL comercial para <i>Unimation</i> por Víctor Scheinman y Bruce Simano.
1974	ASEA introdujo el robot Irb6 de accionamiento completamente eléctrico.
1974	Kawasaki, bajo licencia de Unimation, instaló un robot para soldadura por arco para estructuras de motocicletas.
1974	Cincinnati Milacron introdujo el robot T3 con control por computadora.
1975	El robot "Sigma" de Olivetti se utilizó en operaciones de montaje, una de las primitivas aplicaciones de la robótica al montaje.
1976	Un dispositivo de <i>Remote Center Compliance</i> (RCC) para la inserción de piezas en la línea de montaje se desarrolló en los laboratorios <i>Charles Stark Draper Labs</i> en Estados Unidos.
1978	El robot T3 de Cincinnati Milacron se adaptó y programó para realizar operaciones de taladro y circulación de materiales en componentes de aviones, bajo el patrocinio de <i>Air Force ICAM (Integrated Computer- Aided Manufacturing)</i> .
1978	Se introdujo el robot PUMA (<i>Programmable Universal Machine for Assambly</i>) para tareas de montaje por <i>Unimation</i> , basándose en diseños obtenidos en un estudio de la <i>General Motors</i> .
1979	Desarrollo del robot tipo SCARA (<i>Selective Compliance Arm for Robotic Assambly</i>) en la Universidad de Yamanashi en Japón para montaje. Varios robots SCARA comerciales se introdujeron hacia 1981.
1980	Un sistema robótico de captación de recipientes fue objeto de demostración en la Universidad de Rhode Island. Con el empleo de visión de máquina el sistema era capaz de captar piezas en orientaciones aleatorias y posiciones fuera de un recipiente.
1981	Se desarrolló en la Universidad de Carnegie-Mellon un robot de impulsión directa. Utilizaba motores eléctricos situados en las articulaciones del manipulador sin las transmisiones mecánicas habituales empleadas en la mayoría de los robots.

1982	IBM introdujo el robot RS-1 para montaje, basado en varios años de desarrollo interno. Se trata de un robot de estructura de caja que utiliza un brazo constituido por tres dispositivos de deslizamiento ortogonales. El lenguaje del robot AML, desarrollado por IBM, se introdujo también para programar el robot SR-1.
1983	Informe emitido por la investigación en <i>Westinghouse Corp.</i> bajo el patrocinio de <i>National Science Foundation</i> sobre un sistema de montaje programable adaptable, un proyecto piloto para una línea de montaje automatizada flexible con el empleo de robots.
1984	Robots 8. La operación típica de estos sistemas permitía que se desarrollaran programas de robots utilizando gráficos interactivos en una computadora personal y luego se cargaban en el robot.
1984 en adelante	A partir de los años 60 se da una gran explosión en el campo de la robótica, y más aun a partir de los 80; en 1997 un grupo de la NASA diseñó el <i>Sojourner Rover</i> , el cual es un robot explorador con el fin de ser enviado a Marte para propósitos de exploración (<i>Mars Pathfinder</i>). En el año 1999 la NASA en conjunto con el ejército norteamericano desarrollan robots en miniatura con fines de investigación espacial y militares. En el año 2000 científicos de la NASA desarrollan robots <i>Rangers (scouts)</i> . En el año 2002 son creados <i>nanorobots</i> por un equipo sueco los cuales son capaces de desenvolverse en medios acuosos. Además la Estación Espacial Internacional desarrolla el robonauta el cual tiene como fin realizar reparaciones en la Estación Espacial Internacional.

1.3 Robótica móvil.

Con la llegada de nuevas tecnologías de planificación y razonamiento automático, de 1966 a 1972 se desarrolló en el (SRI) el primer robot móvil llamado *Shakey*, que era una plataforma móvil independiente controlada por visión mediante una cámara y dotada con un detector táctil. A partir de ese momento, la investigación y diseño de robots móviles, que contaron con características muy diferentes entre ellos, creció de manera exponencial.

A principios de la década del setenta, el robot *Newt* fue desarrollado por Hollis. En el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) se desarrolló el *Lunar Rover*, diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el robot *Stanford Cart*, capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea establecida en una superficie, en el *Sundance Australian Integrated Learning* (SAIL). En 1983, el robot *Raibert*, se desarrolló en el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de estos sistemas.

Años más tarde, en 1994, el Instituto de Robótica de la Carnegie Mellon University (CMU) desarrolló el robot *Dante II*, un sistema de seis patas. En 1996 también en el CMU, se desarrolló el robot *Gyrover*, un mecanismo carente de ruedas y patas basado en el funcionamiento del giroscopio. Ese mismo año se desarrolló en el MIT el *Spring Flamingo*, un robot que emulaba el movimiento de un flamenco. Por su parte, la NASA en 1997 envió a Marte un robot móvil teleoperado llamado *Sojournerrover*, dedicado a enviar fotografías del entorno de dicho planeta. Ese mismo año, la empresa japonesa HONDA, dio a conocer el robot P3, el primer humanoide capaz de imitar movimientos del cuerpo humano. Al siguiente año, se desarrolló en la Universidad Waseda en Japón, el WABIAN R-III, un robot humanoide. En 1999 en el CMU, *Zeglin* propuso un nuevo diseño de robot con una pata llamado *BowLeg Hopper*, un diseño que permite almacenar la energía potencial de la pata.

En el 2006 desarrollaron el robot *Ballbot*, un sistema holónimo cuyo movimiento es proporcionado por una sola esfera ubicada en la parte inferior de la estructura. Sin embargo, el estudio de este tipo de robots con una esfera, fue iniciado por Koshiyama y Yamafuji en 1991. Actualmente, los robots teleoperados *Spiritrover* y *Opportunityrover*, se encuentran explorando la superficie del planeta Marte en busca de mantos acuíferos. Los robots aquí mencionados, son únicamente una porción de los tantos que se han diseñado, sin embargo, es posible notar que sus aplicaciones son vastas y que las mismas son ilimitadas debido al desarrollo cada vez más vertiginoso de la tecnología (Siciliano, Sciavicco, & Villani, (2008); Borbón, Rojas, & Viquez, (2003)).

La robótica como la conocemos hoy es el resultado del desarrollo científico-técnico de la humanidad en la última década del siglo XXI, especialmente los robots móviles, con tendencia a emerger cada día más para sustituir a los humanos en tareas muy complejas. A finales del siglo XX, los robots móviles eran controlados por pesados, largos y costosos sistemas de cómputo que no podían ser montados sobre la plataforma móvil y tenían que comunicarse de forma cableada o inalámbrica con el dispositivo. Sin embargo, hoy pueden ser construidos pequeños robots móviles con numerosos actuadores y sensores de bajos costos, dando la flexibilidad de empotrar la CPU al chasis del robot (Bräunl, 2006).

La robótica móvil se basa en la capacidad de un robot de desplazarse en el ambiente. Un robot móvil es un dispositivo formado por componentes físicos y computacionales, divididos en cuatro subsistemas (Ruiz del Solar & Salazar, 2012):

- Locomoción.
- Percepción.
- Razonamiento.
- Comunicación.

Los robots móviles, en comparación con los robots fijos, abren un gran abanico de posibilidades en la realización de tareas, sea de modo automático o controlados de forma remota. Estos sistemas se mueven en ambientes cambiantes con obstáculos que pueden ser aleatorios e inesperados. A diferencia de los robots fijos, los robots móviles cambian con cada movimiento su posición y orientación por lo que deben reconocer constantemente el ambiente donde se mueven para poder adaptarse adecuadamente. Para que un sistema robótico móvil pueda ser exitoso necesita disponer de muchos sensores y tener cierto grado de autonomía.

Los robots pueden ser clasificados como de base fija: robots manipuladores o los que tienen la base móvil: robots móviles. Los robots manipuladores (ver **Figura 1.1**) están formados por una secuencia de cuerpos rígidos (enlaces) interconectados por articulaciones (uniones); un manipulador está compuesto por un brazo que le brinda movilidad, una muñeca que le proporciona destreza y al final un actuador que realiza la tarea para la cual es requerido (Siciliano, Sciavicco, & Villani, 2008).



Figura 1.1: Robot manipulador.

1.3.1 Tipos de robots móviles.

Los robots móviles terrestres se pueden clasificar por el tipo de locomoción utilizado. En general, los tres medios de movimiento de estos robots son: por ruedas, por patas y por cintas de deslizamiento (**Figura 1.2**).

Aunque tanto la locomoción por patas como las de cintas de deslizamiento han sido ampliamente estudiadas, los robots de ruedas son los más empleados con amplia diferencia (Silva, García, Barrientos, & Molina, 2014).

Los vehículos con ruedas son la solución más simple para conseguir la movilidad en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos. Por este motivo el estudio se centró específicamente en este tipo de robots. A continuación, se describen



Figura 1.2: Robots móviles por ruedas, por patas y por cinta.

algunos aspectos referentes a los robots móviles basados en ruedas (Galban, 2014).

1.3.2 Robots móviles con ruedas.

“Se puede definir un robot móvil de ruedas como un sistema electromecánico controlado, que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo y que es capaz de trasladarse de forma autónoma a una meta preestablecida en un determinado espacio de trabajo” (Silva, García, Barrientos, & Molina, 2014).

Dentro de los atributos más relevantes de los robots móviles de ruedas destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven y requieren un número menor de partes y menos complejas, en comparación con los robots de patas y de cintas de deslizamiento. No solo son más sencillos y económicos, sino que, además, la carga que pueden transportar es relativamente mayor. Sin embargo, el uso de ruedas puede traer dificultades para que el robot se mueva en terrenos irregulares o para superar obstáculos mayores que 0,4 veces el radio de sus ruedas (García, 2011).

1.4 Tipos de ruedas.

Se utilizan cuatro tipos de ruedas fundamentales: ruedas convencionales, tipo castor, de bolas y omnidireccionales (**Figura 1.3**).



Figura 1.3: Tipos de ruedas: convencionales, tipo castor, ruedas de bolas y ruedas omnidireccionales.

De acuerdo a su función, las ruedas se pueden clasificar como:

- Rueda motriz (proporciona fuerza de tracción al robot).
- Rueda directriz (su orientación es controlable).
- Ruedas fijas (sólo giran en torno a su eje sin tracción motriz).

- Ruedas locas o ruedas de castor (ruedas orientables no controladas).

1.5 Clasificación de los robots según su configuración.

La configuración da respuesta a cómo se mueve el robot en su entorno y hacia dónde puede dirigirse. La misma incluye la forma física del robot, así como un modelo de cómo el robot puede moverse en su entorno. Este movimiento, para los robots de tierra, se describe en términos de rotación (cómo gira) y de traslación (cómo se mueve hacia delante y hacia atrás).

Las configuraciones pueden ser holonómicas o no holonómicas. En el primer caso el robot holonómico puede moverse en cualquier dirección, mientras que el no holonómico presenta limitaciones en este sentido.

Existen diferentes tipos de configuraciones (Houston, (2003); Silva, García, Barrientos, & Molina, (2014); Siegwart & Nourbakhsh, (2004)), de acuerdo a la cantidad de ruedas, el tipo y el arreglo o lugar donde se ubiquen las mismas en el robot móvil, estando estos tres aspectos muy relacionados. En la presente investigación solo se mencionarán las configuraciones más comunes que aparecen en los robots móviles con ruedas mostradas en la **Figura 1.4** (Ramírez, 2011).

A) Ackerman o tipo carro. El robot de configuración Ackerman es similar a un auto, pues es un vehículo de cuatro ruedas: dos ruedas traseras fijas de tracción y dos ruedas delanteras de dirección.

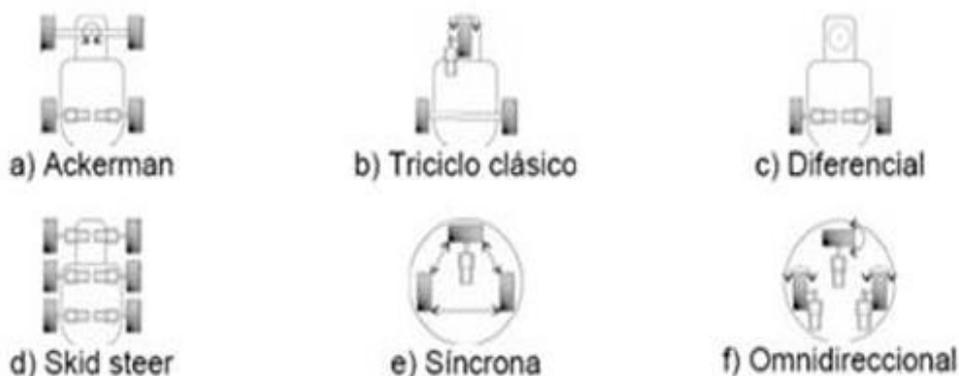


Figura 1.4: Configuraciones de ruedas: a) Ackerman b) Triciclo clásico c) Diferencial d) Skid steer e) Síncrona f) Omnidireccional

Al igual que un carro, el robot con configuración Ackerman es no-holonómico y no puede moverse hacia al lado de manera instantánea, sino que tiene que ejecutar

una serie de movimientos para poder ir hacia esa dirección. Esto no es un gran problema en las áreas despejadas, pero en entornos con obstáculos estos movimientos resultan muy difíciles de realizar.

La ventaja de este tipo de robot es que es más estable y separa la función de dirección de la función de rotación. Además, en este diseño las ruedas de dirección no son motrices, y no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto. Sin embargo, tiene la desventaja de ser mecánicamente más complicado y, por ende, los tipos de movimientos son significativamente más complicados también.

B) Triciclo. El robot triciclo es similar al Ackerman y presenta las mismas limitaciones de movimiento: no puede moverse hacia al lado de manera instantánea. La diferencia más notable entre ambos es que el triciclo solo tiene una rueda delantera de dirección que es a su vez de tracción, por lo que es menos estable. También el triciclo es mucho más simple mecánicamente, porque el carro necesita alguna unión entre las ruedas de dirección. Las dos ruedas traseras son fijas y giran a merced del empuje proporcionado por la delantera.

Al igual que el Ackerman, en este diseño no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto, lo cual es una ventaja respecto al diferencial, por otro lado, tiene la desventaja de poseer un radio de giro que es dado de forma idéntica al del tipo Ackerman.

C) Diferencial. Tanto desde el punto de vista de la programación como de la construcción, el diseño diferencial es uno de los sistemas de locomoción menos complicados. El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas dependiendo de las velocidades a que giren sus ruedas. El robot de configuración diferencial consiste en dos ruedas que se manejan de forma independiente. Estas ruedas están alineadas y, usualmente, se ubican en el centro del robot. El robot gira alrededor del punto que se encuentra a la misma distancia de cada rueda. Si las ruedas están localizadas en el centro del robot, éste puede girar en el lugar sin trasladarse.

Generalmente, al robot diferencial se le añaden una o dos ruedas de apoyo en un diseño triangular o romboidal para mejorar su estabilidad. El diseño triangular

puede no ser suficiente dependiendo de la distribución de pesos del robot, y el romboidal puede provocar inadaptación al terreno si éste es irregular, lo que puede exigir alguna clase de suspensión.

Otro elemento importante en el diseño de estos robots es que la velocidad debe ser controlada dinámicamente, o sea, debe existir un medio de monitorizar y cambiar la velocidad del motor mientras el robot avanza, pues para que el robot se mueva en línea recta sus ruedas tienen que girar a la misma velocidad y cuando los motores encuentran diferentes resistencias las velocidades de los motores varían y el robot gira incluso aun cuando se le haya ajustado inicialmente para que vaya recto. De esta manera, la simplicidad del diseño queda minimizada por la complejidad del sistema de control de la velocidad; no obstante, la reducción de la complejidad mecánica en detrimento de la complejidad de la electrónica y del software es frecuentemente una elección más barata y fiable.

D) SkidSteer. Los robots con esta configuración son similares a un tanque: tienen gran cantidad de ruedas a los lados que no giran o usan esteras. Para que este tipo de robot gire, las ruedas de un lado tienen que ir hacia delante y las del otro hacia atrás, lo que posibilita que el robot se mueva más o menos en el lugar.

La ventaja de estos robots móviles es que, generalmente, pueden moverse mejor en los terrenos accidentados que aquellos robots con otras configuraciones, pues los robots que usan esteras tienen mayor área de contacto con el suelo lo que puede mejorar su maniobrabilidad en terrenos accidentados comparado con los diseños anteriores.

La principal desventaja de esta configuración es que, debido a la gran cantidad de deslizamiento durante un giro, el centro exacto de rotación del robot es difícil de predecir y el cambio exacto de posición y orientación también está sujeto a variaciones, dependiendo del tipo de fricción con el suelo. Por ello, la estimación de la posición haciendo uso de la odometría en estos robots es altamente imprecisa.

E) Síncrona. En la configuración síncrona sus ruedas (generalmente tres), que están enclavadas de modo que siempre apuntan en la misma dirección, son tanto de dirección como de movimiento. También tiene dos motores: uno que guía (dirige) las ruedas y otro que las hace girar.

Con este diseño, el robot es capaz de trasladarse en cualquier dirección sin rotar su chasis, pues para cambiar de dirección gira simultáneamente todas sus ruedas alrededor de un eje vertical pero su chasis sigue apuntando en la misma dirección que tenía. En ocasiones, que el chasis no gire puede constituir una limitación. Si el robot tiene una parte delantera, presumiblemente donde se concentran sus sensores, se tendrá que arbitrar un procedimiento para que su cuerpo se oriente en la misma dirección que sus ruedas.

F) Omnidireccional. Los robots de configuración omnidireccional son aquellos que tienen movilidad para cualquier dirección (holonómico) desde un punto cualquiera en un plano y que no necesitan girar antes de comenzar a moverse, es decir, pueden moverse en cualquier dirección bajo cualquier orientación.

A diferencia de los otros tipos de configuración que no pueden ejecutar desplazamientos laterales, los robots omnidireccionales pueden controlar cada uno de los tres grados de libertad independientemente; lo cual constituye una importante ventaja, pues disminuye la complejidad del sistema de control y permite un movimiento más rápido y preciso.

Este tipo de robots generalmente hace uso de las ruedas omnidireccionales, donde todas son motrices o de tracción y ninguna de dirección. Este tipo de ruedas al ser accionadas giran sobre sí mismas, pero tienen también rodillos que no son motorizados pero que giran libremente sobre las ruedas con un ángulo determinado. Un arreglo muy usado es el de tres ruedas omnidireccionales de 90 grados (en relación al ángulo de giro de los rodillos) alrededor de la circunferencia del robot. Ajustando las velocidades de cada rueda un robot de este tipo puede rotar, o trasladarse libremente, ir hacia delante, hacia atrás y realizar giros.

1.6 Péndulo invertido.

Los péndulos invertidos constituyen un banco de pruebas completo e interesante para la ingeniería de control. Uno de los más estudiados de esta familia de artefactos es el denominado péndulo invertido sobre un vehículo (**Figura 1.5**). Que consiste en un péndulo o varilla que gira libremente por uno de sus extremos mediante una articulación situada sobre un vehículo o sistema móvil que se mueve sobre una guía rectilínea horizontal bajo la acción de una fuerza F . Esta fuerza es

la acción de control con la que se pretende actuar sobre la posición de la varilla. El péndulo invertido es un sistema inestable, ya que puede caer en cualquier momento a menos de que se aplique una fuerza de control adecuada.

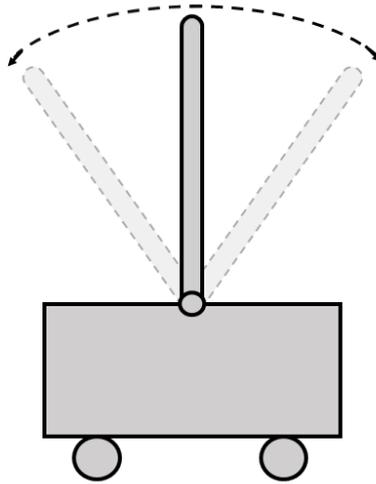


Figura 1.5: Péndulo invertido sobre un vehículo.

1.6.1 Historia del péndulo invertido.

Dada su dinámica inestable, los péndulos invertidos rara vez derivan en productos útiles, sin embargo, su dinámica y control han sido bien estudiados por los ingenieros.

En 1908, A. Stephenson examinó el péndulo invertido y demostró que podía ser estabilizado al aplicar oscilaciones armónicas, rápidas y verticales a su base. En 1909 desarrolló condiciones de estabilidad para péndulos invertidos dobles y triples (Castro, 2012).

En 1932, E. R. Lowenstern desarrolló ecuaciones de movimiento general para los péndulos invertidos, las cuales se relacionaban con el trabajo de Stephenson. Para los años 60's la dinámica del péndulo invertido ya era bien conocida y varios artículos de esta época trataban sobre soluciones analíticas y aproximadas sobre como respondería ante distintas entradas. Estas entradas eran por lo general señales sinusoidales, aleatorias o impulsos (Castro, 2012).

En los años 80's los artículos presentaban controladores que podían estabilizar el péndulo invertido para una mayor variedad de entradas como señales parabólicas o de diente de sierra (Castro, 2012).

M. Sahba utilizó un algoritmo de optimización para diseñar un servocontrolador en lugar de utilizar método usual de diseño de controladores por linealización del sistema. Después T. Yamakawa utilizó un controlador por lógica difusa con un procesador de gran poder con ese mismo propósito (Castro, 2012).

Roberge (1960) demostró una solución para el sistema del péndulo invertido en el MIT en una tesis de diploma nombrada, "El Sello Mecánico". La investigación de Roberge fue supervisada por Leonard Gould.

Los sistemas con múltiples péndulos invertidos independientes estaban descritos por Higdon y Cannon (1963) en Stanford. El artículo de Higdon reconoce el trabajo de Roberge y le da el crédito a Claude Shannon (el padre de teoría de información y el unicyclista ávido).

Schaefer y Cannon (1966) discutieron juntos un artículo sobre los sistemas de péndulos invertidos flexibles. Este artículo (que comparte coautor con Higdon y Cañón (1963)) también acreditó a Shannon con sugerir el sistema, pero no menciona el trabajo de Roberge.

Truxal (1965) escribió un *set* de notas de conferencias del control y modelado en el espacio de estado usando el sistema del péndulo invertido doble como ejemplo. A fines de los 60, las discusiones sobre el péndulo invertido simple fueron incluidas en libros de texto populares como Cannon (1967), Dorf (1967), y Ogata (1970) (con todas las referencias de los debates sobre péndulos invertidos de Higdon y Cañón y (1963)).

La estabilización de un péndulo en su configuración invertida por una base verticalmente oscilante es un ejemplo favorito en clases de física y mecánica clásica. Este sistema de ejemplo fue tratado por una serie de artículos en *American Journal of Physics* por Phelps y Hunter (1965), Blitzer (1965), y Kalmus (1970).

Un artículo reciente por Astrom y Furuta (2000) afirma que "Los péndulos invertidos han sido herramientas clásicas en los laboratorios de control desde 1950".

El control Swing-up del sistema péndulo invertido fue demostrado por Mori (1976). El sistema rotativo del péndulo fue sugerido como una alternativa para el sistema de carro encaminado por Furuta (1991).

1.6.2 Desarrollo en el campo de los robots auto-balaceados.

A continuación, se presentará el estado actual de los robots existentes que se basan en el auto-balanceo mediante dos ruedas y se clasificarán según su aplicación principal.

1.6.2.1 Robots para servicio.

EMIEW (*Excellent Mobility and Interactive Existence as Workmate*) es un robot de dos ruedas auto-balanceable producido por Hitachi. Su versión mejorada es el EMIEW 2 con aproximadamente la mitad de altura y muchísimo más liviano. Es capaz de reconocer la voz humana y entablar pequeñas conversaciones; también es capaz, de reconocer las formas de los objetos, evitar obstáculos utilizando un radar láser para derivar un mapa de su superficie envolvente y además es capaz de movilizarse en superficies irregulares con una velocidad máxima de 6 km/h. Está pensado para su utilización principalmente en viviendas y entornos de oficina (**Figura 1.6**) (Lekshmy, Aleesha, & Athira, 2015).



Figura 1.6: EMIEW 1 (izquierda), EMIEW 2 (derecha).

A.M.P. Bot (*Automated Musical Personality*) (**Figura 1.7**) es también otro robot que basa su locomoción en dos ruedas, auto-balanceándose para mantenerse en equilibrio verticalmente gracias a su giroscopio piezoeléctrico. Fue lanzado por Hasbro's Tiger Electronics y Sega Toys. Es un robot musical que tiene varios modos de funcionamiento. Estos van, desde un modo baile en el que el robot bailará a ritmo de la música que reproduce, a un modo de seguimiento en el que el robot seguirá al usuario reproduciendo música para su entretenimiento. El robot está equipado con sensores infrarrojos para detectar y evitar los objetos, además de sensores *touch-pad* y un control remoto. Para la reproducción de la música posee tres altavoces que ofrecen una potencia de salida de 12 watt. Funciona con seis

pilas de tipo D, aunque también es posible conectarlo a la red eléctrica. Su precio ronda los 500 dólares (Kafetzis & Moysis, 2017).



Figura 1.7: A.M.P. Bot.

1.6.2.2 Robots para transporte.

Segway PT (**Figura 1.8**) es un vehículo unipersonal de transporte de dos ruedas, con auto-balanceo controlado por ordenador, desarrollado por Dean Kamen en el 2001. Tiene un complejo conjunto sensorial del equilibrio basado en cinco giroscopios y dos sensores de inclinación. Su control de la trayectoria se basa en la dirección de inclinación del manillar. Además, es respetuoso con el medio ambiente gracias a sus motores eléctricos. Se puede adquirir por un precio aproximadamente de 7000 €. Existen 2 líneas principales de modelos: la línea básica, llamada i2, y la línea todo terreno, llamada x2 (Bonafilia, 2009).



Figura 1.8: Segway PT.

Segway P.U.M.A. (*Personal Urban Mobility and Accessibility*) (**Figura 1.9**) es un vehículo lanzado conjuntamente por Segway Inc. y General Motors en el 2009, con

capacidad para transportar a dos pasajeros, este vehículo posee la misma tecnología de estabilización de Segway PT para mantener el equilibrio en dos ruedas paralelas durante la conducción. Además de las dos principales ruedas en cada lado del vehículo, hay ruedas estabilizadoras pequeñas en la parte delantera y trasera para apoyar el vehículo mientras está estacionado y sirven además como limitadores del ángulo máximo de inclinación (Lekshmy, Aleesha, & Athira, 2015).



Figura 1.9: Segway P.U.M.A.

1.6.2.3 Robots para uso didáctico o entretenimiento.

El Balanbot (**Figura 1.10**) es un pequeño robot educativo desarrollado por un grupo de ingenieros entusiastas (Steve Chang, Ryan Quin y Bruce Chen), el cual está montado en una estructura de acrílico, utiliza un sensor MPU6050 que combina un giroscopio y un acelerómetro para obtener el ángulo de inclinación y se conecta a la placa Arduino a través de la interfaz I^2C . También integra un L298P como actuador de los motores y además permite una comunicación con otros dispositivos mediante tecnología Bluetooth y Wifi. Presenta un soporte para tres pilas, que es de donde se alimenta el robot. Pesa alrededor de medio kilo y se puede adquirir por aproximadamente unos 100 € (Kafetzis & Moysis, 2017).



Figura1.10: Balanbot Arduino.

nBot Balancing Robot (**Figura 1.11**) es el diseño de un entusiasta llamado David Anderson en el 2003. Este robot utiliza un giroscopio y acelerómetro cuyas salidas se juntan por un filtro Kalman, proporcionando así una entrada precisa para el control de la estabilidad vertical. Una de las buenas propiedades de este robot es ser capaz de desplazarse por terrenos muy abruptos e irregulares (Pincin & J, 2016).



Figura 1.11: nBot.

1.7 Plataforma Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación *Processing / Wiring* y el cargador de arranque (*bootloader*) que corre en la placa (**Figura 1.12**).

Desde octubre de 2012, Arduino se usa también con microcontroladores CortexM3 de ARM de 32 bits, que coexistirán con las más limitadas, pero también económicas AVR de 8 bits. ARM y AVR no son plataformas compatibles a nivel binario, pero se pueden programar con el mismo IDE de Arduino y hacerse programas que compilen sin cambios en las dos plataformas. Eso sí, los microcontroladores CortexM3 usan 3.3 V, a diferencia de la mayoría de las placas con AVR que usan mayoritariamente 5 V. Sin embargo, ya anteriormente se lanzaron placas Arduino con Atmel AVR a 3.3 V como la Arduino Fio y existen clónicos de Arduino Nano y Pro como Meduino en que se puede conmutar el voltaje.

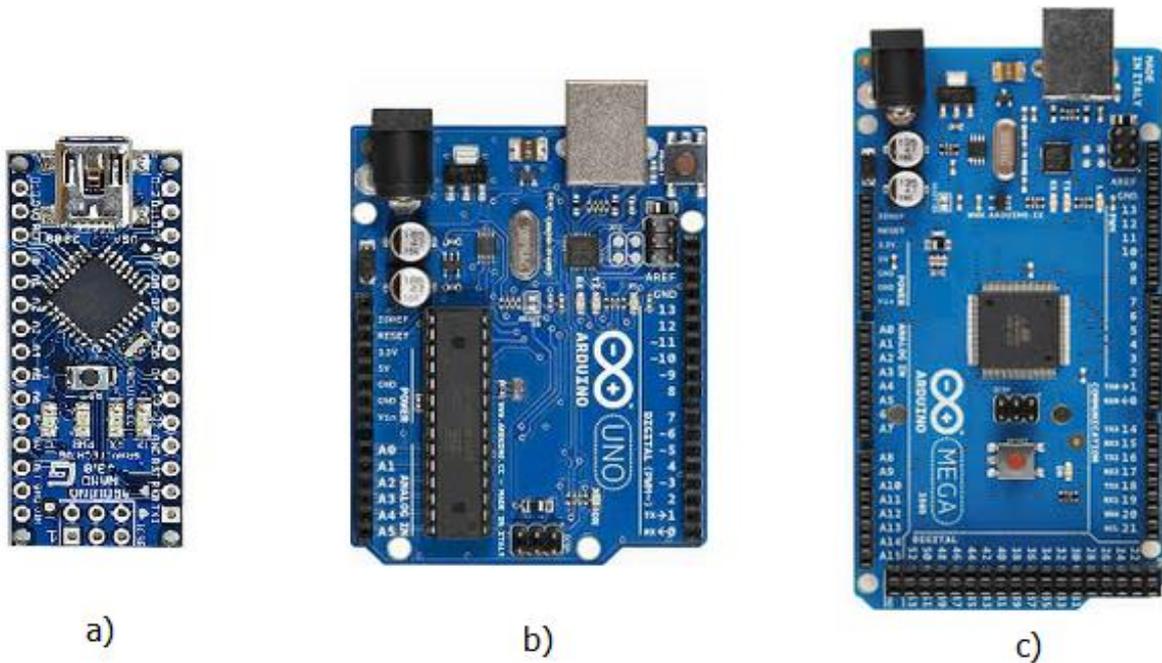


Figura 1.12 Diferentes modelos de Placas Arduino. a) NANO b) UNO c) MEGA

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software de ordenador (por ejemplo: *Macromedia Flash*, *Processing*, *Max/MSP*, *Pure Data*). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

1.7.1 Historia de la plataforma de Arduino.

Arduino se inició en el año 2005 como un proyecto para estudiantes en el Instituto IVREA, en Ivrea (Italia). En ese tiempo, los estudiantes usaban el microcontrolador BASIC Stamp, cuyo costo era de 100 USD lo que se consideraba demasiado costoso para ellos. Por aquella época, uno de los fundadores de Arduino, Massimo Banzi, daba clases en Ivrea.

El nombre del proyecto viene del nombre del Bar di Re Arduino (Bar del Rey Arduino) donde Massimo Banzi pasaba algunas horas. En su creación, contribuyó el estudiante colombiano Hernando Barragán, quien desarrolló la tarjeta electrónica Wiring, el lenguaje de programación y la plataforma de desarrollo. Una vez concluida dicha plataforma, los investigadores trabajaron para hacerlo más ligero, más económico y disponible para la comunidad de código abierto (hardware y código abierto). El instituto finalmente cerró sus puertas, así que los investigadores, entre ellos el español David Cuartielles, promovieron la idea. Banzi afirmaría años

más tarde, que el proyecto nunca surgió como una idea de negocio, sino como una necesidad de subsistir ante el inminente cierre del Instituto de Diseño Interactivo IVREA. Es decir que, al crear un producto de hardware abierto, éste no podría ser embargado.

Posteriormente, Google colaboró en el desarrollo del Kit Android ADK (Accessory Development Kit), una placa Arduino capaz de comunicarse directamente con teléfonos móviles inteligentes bajo el sistema operativo Android para que el teléfono controle luces, motores y sensores conectados de Arduino.

Para la producción en serie de la primera versión se tomó en cuenta que el coste no fuera mayor de 30 €, que fuera ensamblado en una placa de color azul, debía ser *Plug and Play* y que trabajara con todas las plataformas informáticas tales como MacOSX, Windows y GNU/Linux. Las primeras 300 unidades se las dieron a los alumnos del Instituto IVRAE, con el fin de que las probaran y empezaran a diseñar sus primeros prototipos.

En el año 2005, se incorporó al equipo el profesor Tom Igoe, que había trabajado en computación física, después de que se enterara del mismo a través de Internet. Él ofreció su apoyo para desarrollar el proyecto a gran escala. En la feria Maker Fair del 2011 se presentó la primera placa Arduino para trabajar tareas más complejas, entre ellas se presentó la impresora en 3D de MakerBot capaz de imprimir en resina cualquier modelo en 3D.

Debido a sus grandes facilidades y múltiples ventajas en la actualidad se han desarrollado diferentes tipos de Arduino con diferentes funcionalidades y prestaciones (Evans, Noble, & Hochenbaum, 2013).

1.8 Motores.

Los actuadores son los dispositivos encargados de efectuar acciones físicas ordenadas por algún sistema de control. Esta acción física puede ser un movimiento lineal o un movimiento circular según sea el caso.

El proceso bajo control, la acción que se tiene que llevar a cabo y la velocidad con que ésta deba realizarse, son factores que influyen en la clase de actuador que se ha de utilizar. Generalmente se consiguen tres tipos de actuadores: los hidráulicos, los neumáticos y los eléctricos, en este trabajo los actuadores utilizados son eléctricos, específicamente motores.

Por definición, el motor eléctrico es un dispositivo electromotriz, es decir, que convierte la energía eléctrica en energía motriz. Todos los motores disponen de un eje de salida para acoplar un engranaje, una rueda, una polea o cualquier mecanismo capaz de transmitir el movimiento creado por el motor. La etapa de elección de un motor puede ser una tarea muy complicada según las limitaciones del proyecto, si se tiene en cuenta todas las características que definen al motor, éstas son: tamaño, peso, velocidad (rpm), torque, tensión y, la más sensible: el costo. En la actualidad, existen diferentes tipos de motores, que se describen a continuación.

1.8.1 Motores de CD (Corriente Directa).

Son los motores más comunes y que casi todos conocen (**Figura 1.13**). El funcionamiento del motor se basa en la acción de campos magnéticos opuestos que hacen girar el rotor (eje interno) en dirección opuesta al estator (imán externo o bobina). De este modo, si se sujeta la cubierta del motor por medio de soportes o bridas, el rotor con el eje de salida será lo único que girará. Para cambiar la dirección de giro en un motor de corriente continua, tan sólo se debe invertir la polaridad de su alimentación eléctrica. Un detalle importante es que, casi siempre, se utilizan acompañados de un sistema de engranajes que reducen la velocidad y proporcionan mayor fuerza, dado que este tipo de motores carece de esta cualidad. Es conveniente conseguir el conjunto completo porque las adaptaciones son complicadas y pocas veces se obtienen muy buenos resultados.



Figura 1.13: Motores de CD.

1.8.2 Servomotores.

El servomotor es un pequeño pero potente dispositivo que dispone en su interior de un pequeño motor con un reductor de velocidad y un multiplicador de fuerza (**Figura 1.14**). También cuenta con un pequeño circuito eléctrico encargado de gobernar el sistema. El recorrido del eje de salida es de 180° en la mayoría de ellos, pero se puede modificar con facilidad para tener un recorrido libre de 360° y, entonces, actuar como un motor común.

El control de posición lo efectúa el servomotor en forma interna mediante un potenciómetro que va conectado en forma mecánica al eje de salida. Éste controla un PWM (*Pulse Width Moduler* o Modulador de Ancho de Pulsos) interno para compararlo con la entrada PWM externa del servomotor, mediante un sistema diferencial y así, modificar la posición del eje de salida hasta que los valores se igualen y el servomotor se detenga en la posición indicada.

En esta posición, el motor del servomotor deja de consumir corriente y sólo circula una pequeña cantidad hasta el circuito interno. Si en ese momento el servomotor es forzado (al mover el eje de salida con la mano), el control diferencial interno lo detecta y manda la corriente necesaria al motor para corregir la posición. Para controlar un servomotor, debe ser aplicado un pulso de duración y una frecuencia específicos. Todos los servomotores disponen de tres cables: dos para la alimentación y uno para aplicar el tren de pulsos de control que harán que el circuito de control diferencial interno ponga el servomotor en la posición indicada por la anchura del pulso. Los servomotores son una muy buena alternativa, ya que traen integrado un sistema reductor que garantiza una ganancia de fuerza. La desventaja para algunas aplicaciones es que, en general, son lentos. Se utilizan mucho en los

automóviles y aviones radiocontrolados, principalmente para accionar el mecanismo que les da la dirección.



Figura 1.14: Servomotores.

1.8.3 Motores Paso a Paso.

Los motores paso a paso (**Figura 1.15**) son motores diseñados específicamente para poder controlar su posición angular con precisión. En ellos se ha primado el posicionamiento antes que la posibilidad de girar libremente a grandes velocidades. En este tipo de motores, para que el eje rote, se aplica una secuencia determinada de señales digitales. Esta secuencia está constituida por diferentes pasos en un orden específico y cada vez que la secuencia de control incrementa o decrementa un paso, el motor incrementa o decrementa un valor fijo en su posición angular. El valor de ese incremento estará determinado por el tipo de secuencia que el motor haya recibido y por las características constructivas del motor.

Otra diferencia con los motores tradicionales es que en los motores paso a paso, el torque o esfuerzo que pueden aplicar al eje del mismo es mayor cuanto menor es la velocidad de giro. Esto implica que un motor paso a paso en reposo energizado puede mantener su posición angular aún ante determinados esfuerzos tangenciales. En los motores tradicionales esto no es posible, si el motor es energizado gira, y si es desenergizado no puede sostener ningún esfuerzo en su eje, a menos claro, que sea aplicado algún tipo de mecanismo de freno.

Los motores paso a paso, como todo motor, son en esencia un convertidor electromecánico, que transforma la energía eléctrica en mecánica; pero de un modo tan peculiar que constituye en la actualidad una categoría aparte. En efecto, mientras que un motor convencional gira libremente al aplicar una tensión comprendida dentro de ciertos límites, el motor paso a paso está concebido de tal

manera que gira un determinado ángulo proporcional a la "codificación" de tensiones aplicadas a sus entradas.



Figura 1.15: Motores paso a paso.

Conclusiones Parciales.

- Se exponen los elementos más representativos del campo de la robótica; generalidades, clasificaciones de los robots y dentro de éstos, se les da especial atención a los robots móviles sobre ruedas.
- Se explican las generalidades sobre los péndulos invertidos y las principales investigaciones que se han hecho sobre el tema.
- Se da a conocer el avance actual de los robots auto-balanceados, así como sus aplicaciones.
- Se describen los principales tipos de motores empleados como actuadores en la robótica móvil.

CAPÍTULO 2. Construcción y puesta en marcha del robot balancín.

Introducción.

Las aplicaciones basadas en la teoría del péndulo invertido se están volviendo muy comunes con el paso del tiempo. La singularidad y amplias aplicaciones de este sistema inestable ha ganado popularidad entre los investigadores y los entusiastas de la robótica de todo el mundo. Los péndulos invertidos constituyen un banco de pruebas completo e interesante para la ingeniería de control (Houston, (2003); Aracil & Gordillo, (2005); Kafetzis & Moysis, (2017)). En este capítulo se explica el diseño y montaje del robot de balanceo de dos ruedas basado en la teoría del péndulo invertido. La meta es hacer un robot auto-balanceado. La idea básica es que se tiene una masa situada por encima de su punto de pivote, esto hace que el robot sea inestable, y sin ninguna ayuda, caerá rápidamente. Los sensores tomarán mediciones del ángulo de inclinación, las cuales serán enviadas a un controlador que enviará una señal a los motores acoplados a las ruedas, indicándole en qué dirección y cuánto mover para mantener el robot en posición vertical, o sea, el objetivo principal de este proceso es mantener el centro de masa del sistema en posición vertical. Este proyecto implica una amplia gama de conocimientos de matemáticas, mecánica y programación (Sundin & Thorstensson, 2012).

2.1 Concepción general de robot balancín.

El estudio bibliográfico realizado arrojó que existen todo tipo de formas y tamaños de balancines, cada uno con sus requisitos y características muy particulares. Para el diseño del modelo escogido para este trabajo se tomaron algunas consideraciones practicas seleccionadas a partir de experiencias previas de otros autores, entre ellas están (Arvidsson & Karlsson, (2012); Bageant, (2011); Sanchez, Iñaki, & Patete, (2010)):

- Montar una estructura de 2 o más niveles para la fijación de la electrónica.
- No debe ser demasiado alto, lo mejor es que el diámetro de sus ruedas sea $\frac{1}{3}$ de la altura del robot.
- Las baterías deben quedar en la parte de abajo.
- El material a usarse debe ser lo más ligero y resistente posible. Se usó acrílico, barra sinfín, tuercas M6, lamina de acero y ruedas de plástico con recape de goma.

La electrónica de este sistema se puede dividir en tres componentes principales: el microcontrolador, el subsistema de medición y el subsistema de controladores de motores (**Figura 2.1**). Como unidad de control (MCU del inglés *Master Control Unit*) se utilizó un microcontrolador Arduino UNO. El subsistema de medición consta de la unidad de medida inercial (IMU del inglés *Inertial Measurement Unit*) GY_85 que tiene integrado un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro, todos de tres ejes y un sensor de temperatura, pero en esta tesis no hacemos uso de estos dos últimos. La IMU mide los vectores gravitacionales y rotatorios tridimensionales y los envía a la MCU a procesar. Entonces, la MCU filtra el ruido del sensor y, a continuación, fusiona los datos de los dos sensores para producir una sola lectura de inclinación por motivos que se explicaran más adelante. Una vez que se conoce la inclinación actual, la MCU calcula el error desde la inclinación deseada, en este caso la vertical, y luego utiliza un algoritmo de control PID para controlar la salida hacia los *drivers* de los motores (Muños,(2013); Ochoa, (2011)).

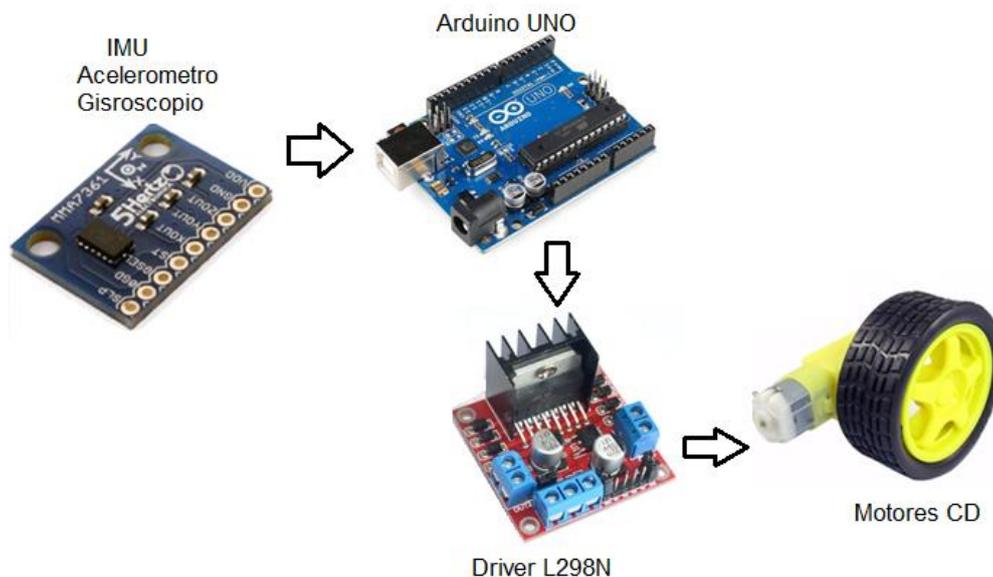


Figura 2.1: Bloques principales del robot auto-balanceado.

La IMU es un módulo electrónico que consta de más de un módulo en una sola unidad, que toma datos de velocidad angular y aceleración lineal como entradas y se envía al procesador principal. El sensor IMU en realidad contiene principalmente dos sensores separados. El primero es el acelerómetro, para describir la aceleración sobre tres ejes genera tres señales analógicas y actúa sobre los planos del vehículo. Debido a las limitaciones físicas y al sistema propulsor, la salida significativa detectada de estas aceleraciones es para la gravedad. El segundo

sensor es el giroscopio. También da tres señales analógicas que describen las velocidades angulares del vehículo alrededor de cada eje del sensor. No es necesario colocar la IMU en el centro de masa del vehículo, porque la velocidad angular no se ve afectada por aceleraciones lineales o angulares. Los datos de estos sensores son recogidos por el microcontrolador (Chuan, 2015).

El chasis quedó constituido con una estructura de tres niveles de acrílicos sujetos por varillas de acero y los motores-ruedas en la parte inferior (**Figura 2.2**).



Figura 2.2: Estructura General del chasis del robot balancín.

El nivel inferior es para las baterías y unos potenciómetros que serán añadidos para variar los parámetros de ajuste del controlador, en el nivel medio va ubicado el Arduino y los reguladores de voltaje para fijar la alimentación para los motores y el microcontrolador, además, en este nivel, pero en la parte inferior se colocará el IMU y el nivel superior para los *drivers* de los motores.

2.2 Modelado Matemático del Péndulo Invertido.

El objetivo de la fase de modelado es encontrar una expresión matemática que represente el comportamiento físico del sistema. Para modelar el sistema existen dos estrategias. La primera es tratar al sistema como un “caja negra” y realizar sobre él un conjunto de acciones (señales de entrada) observando cómo se comporta (estudiar las salidas) deduciendo un modelo matemático para éste. Un ejemplo sería la técnica de Ziegler-Nichols. La segunda consiste en estudiar los procesos físicos que tienen lugar en el sistema para deducir su ley de comportamiento. El resultado que se pretende es la identificación del sistema a través de su función de transferencia (Seo, 2007).

Uno de los modelos más estudiados es el denominado péndulo invertido sobre un vehículo, del cual aquí se analiza el modelo matemático tomando como el péndulo, el cuerpo del robot, así mismo, las ruedas como el vehículo.

2.2.1. Análisis de las fuerzas y sistema de ecuaciones

Hallar un modelo es una tarea complicada, y por ello, a menudo es necesario recurrir a la sencillez. En el caso del péndulo, se consigue con el análisis por separado de cada uno de los cuerpos.

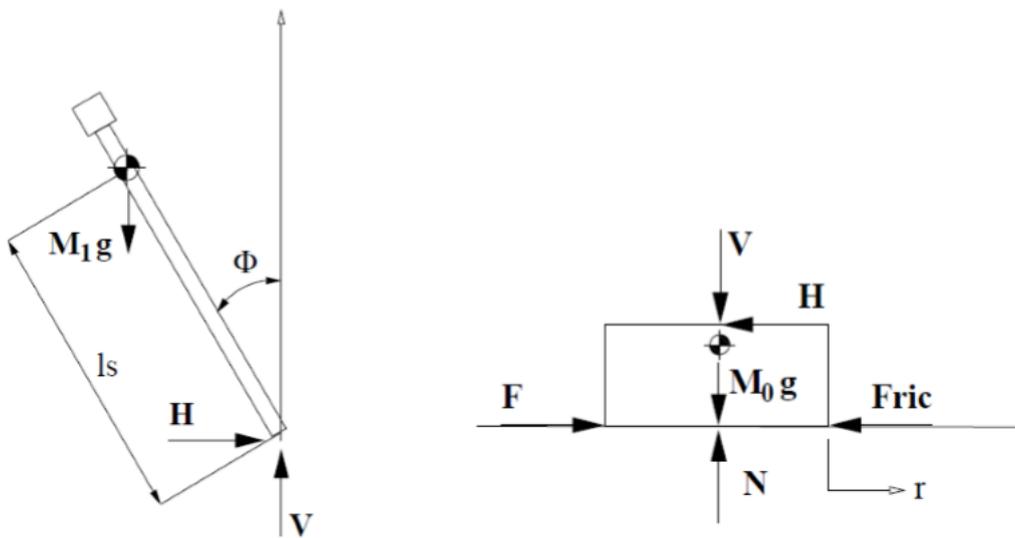


Figura 2.3: Diagramas de cuerpo libre del sistema.

M: Masa del carro

m: Masa del péndulo

b: Fricción del carro

l: Longitud péndulo

I: Inercia del péndulo

F: Fuerza aplicada al carro

x: Coordenadas de posición del carro

Θ : Ángulo del péndulo

El péndulo invertido (**Figura 2.3**) se puede concebir básicamente como un cuerpo rígido cuyo movimiento se limita a dos dimensiones. Las ecuaciones fundamentales de movimiento plano de un cuerpo rígido son:

$$\sum F_i = ma_i \quad (2.1)$$

$$\sum F_j = ma_j \quad (2.2)$$

$$\sum F_G = I\alpha_g \quad (2.3)$$

Sumando las fuerzas en el diagrama de cuerpo libre del carro en la dirección horizontal, se obtiene la siguiente ecuación del movimiento:

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (2.4)$$

También se podría sumar las fuerzas en la dirección vertical, pero no se ganaría ninguna información útil. Por otro lado, sumando las fuerzas en el diagrama de cuerpo libre del péndulo en la dirección horizontal, se puede obtener una ecuación para N:

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2.5)$$

Si se sustituye esta ecuación en la (2.4), se obtiene la primera ecuación del movimiento de este sistema:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (2.6)$$

Para obtener la segunda ecuación del movimiento, es necesario sumar las fuerzas perpendiculares al péndulo. Resolviendo el sistema a lo largo de este eje se simplifica el cálculo algebraico.

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (2.7)$$

Para librarse de los términos P y N en la ecuación (2.7), se han sumado los momentos sobre el centroide del péndulo para obtener la primera ecuación (2.8) mostrada a continuación. Finalmente, combinando dicha ecuación con la (2.6), se obtiene la segunda ecuación dinámica (2.9).

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = I\ddot{\theta} \quad (2.8)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml\ddot{x} \cos \theta \quad (2.9)$$

Para facilitar la labor, se puede trabajar solo con funciones lineales. Para ello, se asume que $\theta = \pi + \phi$, donde ϕ representa un pequeño ángulo en la dirección vertical. Por lo tanto, las dos ecuaciones de movimiento serán:

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (2.10)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u \quad (2.11)$$

2.2.2 Función de transferencia.

Cualquier sistema físico (mecánico, eléctrico, etc.) se puede traducir a una serie de valores matemáticos a través de los cuales se conoce el comportamiento de estos sistemas frente a valores concretos. Esto es lo que permite la función de transferencia. Se trata de un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema (salida) a una señal de entrada o excitación. Por definición, una función de transferencia se puede determinar según la expresión:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.12)$$

Donde $H(s)$ es la función de transferencia (también denotada como $G(s)$). $Y(s)$ es la transformada de Laplace de la respuesta y $U(s)$ es la transformada de Laplace de la señal de entrada. Aplicándolo al péndulo invertido, para obtener analíticamente la función de transferencia de las ecuaciones del sistema linealizado, se ha de tomar primero la transformada de Laplace de las ecuaciones del sistema. Donde se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$(I + ml^2)\Phi(s)s^2 - mgl\Phi(s) = mlX(s)s^2 \quad (2.13)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\Phi(s)s^2 = U(s) \quad (2.14)$$

Dado que la salida de interés en este caso es el ángulo Φ (Φ), en primer caso se resuelve la primera ecuación para $X(s)$, donde posteriormente se sustituirá en la segunda ecuación:

$$X(s) = \left[\frac{(I+ml^2)}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) \quad (2.15)$$

$$(M + m) \left[\frac{(I+ml^2)}{ml} + \frac{g}{s} \right] \Phi(s)s^2 + b \left[\frac{(I+ml^2)}{ml} + \frac{g}{s} \right] \Phi(s)s - ml\Phi(s)s^2 = U(s) \quad (2.16)$$

Reordenando la función de transferencia se obtiene:

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s^2}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s} \quad (2.17)$$

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2]$$

De la función de transferencia de arriba puede verse que hay un polo y un cero en el origen. Éstos pueden ser cancelados y la función de transferencia será:

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^2 - \frac{(M+m)mgl}{q}s - \frac{bmgl}{q}} \quad (2.18)$$

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2]$$

En este punto ya se tiene calculada la función de transferencia que representa al sistema físico del péndulo invertido.

2.3 Descripción de los sensores y actuadores del sistema.

En este epígrafe se brinda una detallada descripción de las especificaciones técnicas, características, funcionamiento e interconexión de todos los bloques que componen el robot.

2.3.1 Sensor de inclinación.

Para que el robot pueda mantener su equilibrio, requiere sensores que le permitan medir su inclinación con precisión y con una alta velocidad de medición. Para ello, se dispone del GY_85 que es un sensor múltiple que integra:

- ADXL345 acelerómetro
- ITG3200 giroscopio
- MC5883L magnetómetro.

Como características genéricas y especificaciones se pueden mencionar las siguientes:

- Tarjeta sensor IMU 9 ejes: acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio de 3 ejes y un magnetómetro (brújula) de 3 ejes.
- Comunicación por Interface I^2C
- Puede operar con señales de 3 - 5 V ya que incorpora convertidor de niveles lógicos
- Entrada directa de alimentación externa a 3.3 V regulados (Pin 3.3 V)
- Dimensiones: 2.15 cm x 1.7 cm

Todos los sensores individuales son accesibles a través del protocolo I^2C que sólo necesita 4 conexiones para acceder a todos los sensores: SDA, SCL, GND y VCC (**Ver Tabla 2.1**). El sensor es ideal para diseñar control de robótica, medición de vibración, sistemas de medición inercial (IMU), detector de caídas, sensor de distancia y velocidad, vehículos aéreos no tripulados y muchas otras.

Tabla 2.1: Relación de pines de la IMU GY-85.

Nemotécnico	Descripción
GND	Este pin debe ser conectado a tierra.
VCC	Voltaje de alimentación
CS	Selección de Chip
INT1	Salida Interrupción 1
INT2	Salida Interrupción 2
SDO	Salida serie de Datos (SPI 4-Cables) / I^2C Selección de dirección
SDA / SDI / SDIO	Datos en Serie I^2C / Entrada Serie de Datos (SPI 4-Cables) / Salida y Entrada Serie de Datos (SPI 3-Cables)
SCL/SCLK	Reloj de Comunicación Serial

2.3.1.1 Acelerómetro ADXL345.

El ADXL345 soporta los rangos de 2G, 4G, 8G y 16G. La resolución puede ser de 10 o 13 bits (puede detectar cambios de menos de 1 grado). El valor de la medición es un valor en bruto. El ADXL345 usa por defecto la configuración de 10 bits y +-

2G (rango de 4G). También tiene algunas funcionalidades extras como la detección de *tap* y doble *tap*, que puede ser usada para disparar una interrupción en Arduino. También viene con una buena calibración y es posible calcular nuevos valores para calibración y guardarlos en el *chip*. Estos serán automáticamente aplicados para futuras mediciones. La vía más común de calibrarlo es tomar algunas mediciones en estado de reposo y calcular un promedio (Irigoyen, 2015).

Para alcanzar la resolución más alta, el rango debe ser el más bajo posible. Dado que el acelerómetro sólo debe utilizarse para estimar el ángulo, la máxima salida del acelerómetro debería ser de 1 g. Por lo tanto, se fijó a 0 – 2 g ya que era más que suficiente para los propósitos aquí perseguidos.

El chip retorna los valores digitalizados del sensor, para estar aptos para trabajo posterior, los valores son convertidos a unidades comunes tales como G.

$$G_{Acel} = Valor_{acel} * \frac{Rango}{2^{Resolución}} \quad (2.19)$$

$$G_{Acel} = Valor_{acel} * \frac{4}{1024} \quad (2.20)$$

$$G_{Acel} = Valor_{acel} * 0.0039 \quad (2.21)$$

Los valores resultantes se espera que estén entre +-1G.

Estas mediciones son un poco inestables y pueden ser filtradas. La siguiente ecuación es un ejemplo de un filtro pasa bajo que atenúa las altas frecuencias de la señal.

$$y_t = \alpha * x_t + (1 - \alpha) * y_{t-1} \quad (2.22)$$

Donde y_t es la señal filtrada, y_{t-1} la señal filtrada en el periodo anterior, x_t la lectura del acelerómetro y α el factor de suavizado.

El filtrado debe ser hecho antes de calcular los ángulos. Entre más bajo sea el factor de filtrado, más le quita al ángulo para estabilizar así que no se debe poner muy bajo porque se estaría perdiendo parte del comportamiento en tiempo real.

El acelerómetro mide la aceleración en las direcciones de los ejes x y y z para el robot. La rotación en eje X es llamada *Roll*, la rotación en eje Y es llamada *Pitch* y

la rotación en eje Z es llamada *Yaw*, pero esta última no puede ser medida en un acelerómetro de 3 ejes ya que el vector fuerza de gravedad no cambia durante el movimiento.

El ángulo del péndulo es calculado por la función *arctan*.

$$pitch = \arctan\left(\frac{G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_z^2}}\right) \quad (2.23)$$

$$roll = \arctan\left(\frac{-G_x}{G_z}\right) \quad (2.24)$$

Estos valores quedan en radianes por lo que hay que convertirlos a grados multiplicándolos por $180/\pi$. El denominador de la ecuación *Pitch* está definido para ser siempre positivo, la ecuación por si misma provee un rango de $[-90, 90]$, el cual es exactamente lo esperado para el ángulo *Pitch*. En contraste, la ecuación *Roll* provee un rango de $[-180, 180]$. Es importante tener esto en cuenta cuando el ángulo *pitch* es 90° , el eje *Roll* está directamente alineado con el vector de gravedad, entonces no se puede medir más el ángulo *Roll*, esto es conocido como *Giambal Lock*.

2.3.1.2 Giroscopio ITG3200.

EL GY-85 usa el Giroscopio ITG3200 InvenSense para medir la orientación. Puede medir el movimiento en los 3 ejes y los valores son digitalizados usando un ADC (Analog Digital Converter) de 16 bits. Además, tiene integrado un sensor de temperatura (Irigoyen, 2015).

Es necesario dividir el valor medido por un Factor de Sensibilidad de Escala para obtener el valor en $^\circ/seg$ que puede ser encontrado en el *datasheet*. Este factor es constante y vale 14.375 LSB por $^\circ/seg$.

$$Valor(^\circ/seg) = \frac{Valor\ Medido}{14.375} \quad (2.25)$$

Luego se convierte a ángulo.

$$Angulo = Valor * \Delta t(seg) \quad (2.26)$$

2.3.2 Tarjeta Electrónica Arduino UNO.

El robot cuenta con una tarjeta electrónica Arduino UNO que controla y administra todo el sistema (**Figura 2.4**). Es una placa electrónica basada en el microprocesador ATmega328 y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Cuenta con 14 entradas / salidas digitales pines (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP, y un botón de reinicio. El Uno difiere de todas las placas anteriores en que no utilizan el chip controlador USB FTDI serie.

Especificaciones:

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltaje de operación: 5 V
- Voltaje de alimentación recomendado: 7-12 V
- Máximo Voltaje de alimentación (no recomendado): 20 V
- Pines digitales de I/O: 14 (de los cuales 6 proveen salida PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente DC por pin I/O: 40 mA
- Corriente de directa por el pin 3.3 V: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de 0.5 KB usado por el bootloader
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Velocidad de reloj: 16 MHz



Figura 2.4: Arduino UNO.

2.3.3 Motor Shield (L298N).

Este *shield* permite manejar un canal para motores de paso a paso y dos para motores de CD. Usa el chip L298N el cual entrega una corriente a la salida de 2 A por cada canal (**Figura 2.5**). El control de velocidad se lleva a cabo a través del PWM convencional que puede ser obtenido de los pines 3, 4, 5, 6, 7, 8 para cada motor respectivamente del Arduino como se muestra en las **Tablas 2.2 y 2.3**. Este *shield* puede ser alimentado directamente desde el Arduino o desde una fuente externa. Es altamente recomendable usar una fuente de alimentación externa. En este trabajo se alimenta con una fuente de 8 V, 2 A máx., para que los motores tengan un consumo independiente. Para el diagrama eléctrico en **Anexo 1**.

Especificaciones:

- Voltaje de la lógica de Control: 5 V (del Arduino)
- Voltaje de manejo de motor: 4.8-35 V (de Arduino o Fuente Externa)
- Corriente de alimentación de la lógica I_{ss} : ≤ 36 mA
- Corriente de alimentación del motor I_o : ≤ 2 A
- Máximo consumo de potencia: 25 W ($T=75^{\circ}\text{C}$)
- Control de velocidad mediante PWM o PLL
- Nivel de la señal de Control:
 - ✓ Alto: $2.3\text{ V} \leq V_{in} \leq 5\text{ V}$
 - ✓ Bajo: $-0.3\text{ V} \leq V_{in} \leq 1.5\text{ V}$

El *shield* soporta los modos de control PWM y PLL (*Phased Locked Loop*). El PWM usa E1 y E2 para generar la señal PWM (**Tablas 2.2 y 2.3**).

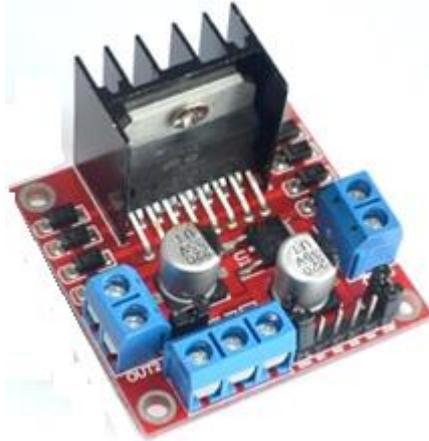


Figura 2.5: Shield de control de motores DC y paso a paso.

Tabla 2.2: Tabla de la verdad de la señal de control.

E1	M1		E2	M2	
L	X	Motor 1 Deshabilitado	L	X	Motor 2 Deshabilitado
H	H	Motor 1 Reversa	H	H	Motor 2 Reversa
PWM	X	PWM Control de Velocidad	PWM	X	PWM Control de Velocidad

Tabla 2.3: Modo PWM.

Pin	Función
Digital 4	Motor 1 Control de dirección
Digital 5	Motor 1 Control de PWM
Digital 6	Motor 2 Control de PWM
Digital 7	Motor 2 Control de dirección

El modo de control PWM (**Figura 2.6**) es usado para simular diferentes valores de voltaje acotados por el ajuste del voltaje aplicado a lo largo del nivel del motor para garantizar la velocidad.

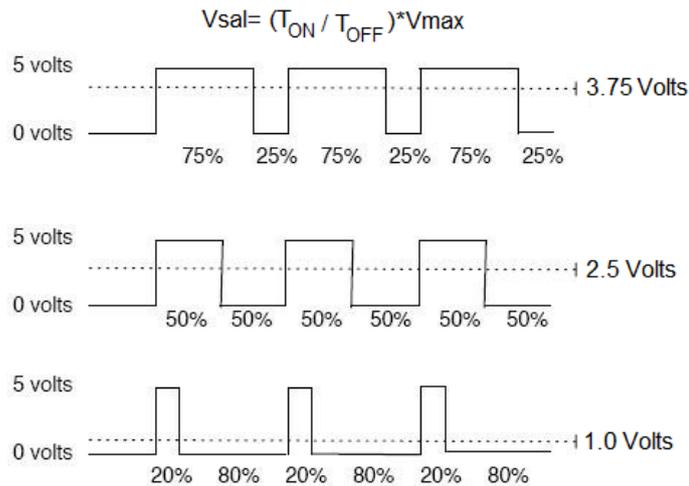


Figura 2.6: Método de control de velocidad mediante PWM.

El núcleo de todo el sistema del *driver* es el integrado L298N (**Figura 2.7**). El mismo contiene 4 *drivers pushpull* que pueden ser usados independientes o más comúnmente, como 2 puentes completos. Cada *driver* es controlado por una lógica TTL en la entrada y cada par de *drivers* está equipado con una entrada de habilitación con la cual controla cada puente completo.

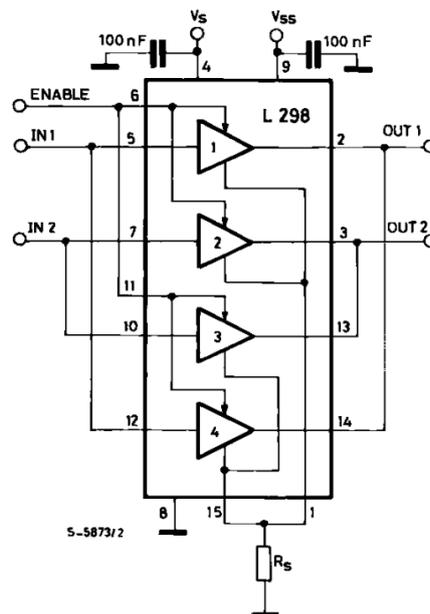


Figura 2.7: Diagrama de conexiones de L298N.

2.3.4 Mecanismo Motor-Reductor-Rueda.

Para el sistema de locomoción del motor se usó un módulo disponible comercialmente para esto fines que integra un mecanismo reductor, un motor de CD y una rueda de plástico con un recubrimiento de goma, todo en una sola unidad (**Figura 2.8**).



Figura 2.8: Módulo para el motor de CD.

El modulo básicamente es una rueda de goma de 65 mm acoplada a un motor y una caja reductora. Es un conjunto sencillo y practico ideal para iniciación con pequeños motores de CD y ruedas a su medida. Los motores consumen alrededor de 60 mA cada uno y aceptan una tensión entre 3 y 6 volt. Por eso se puede utilizar un conjunto de 4 o 6 pilas para alimentarlo cómodamente, a través del conector de alimentación externa del Arduino (no directamente, ya que 6 pilas x 1,5 V = 9 V).

Detalles del producto:

- Tamaño del motor: 70 mm x 22 mm x 18 mm
- Motor Peso: 50 g
- Diámetro de la llanta: 66 mm
- Reductora: 48: 1
- Ancho neumático ancho: 25 mm
- Tensión entre 3 V y 12 V (recomendado 6 a 8 volt)

Otras características del motor se pueden ver en la **Tabla 2.4**.

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas del motor de CD.

Voltaje	Parámetros	3 V CD	5 V CD	6 V CD
Parámetros del motor (sin caja reductora).	RPM	6000 RPM		
	Corriente	80-100 mA		
Parámetros de la caja reductora	Reducción	48:1		
	Velocidad sin carga	125 RPM	200 RPM	230 RPM
	Velocidad con carga	95 RPM	160 RPM	175 RPM
	Torque de salida	0.8 kg*cm	1.0 kg*cm	1.1 kg*cm
	Corriente	110-130 mA	120-140 mA	130-150 Ma
	Diámetro máximo de rueda	6.5 cm		
	Dimensiones	70 mm x 22 mm x 18mm		
	Peso	50 g		
	Ruido	65 dB		

2.4 Estrategia para medición combinada del ángulo.

Para medir el ángulo se tienen dos sensores, acelerómetro y giroscopio, ambos tienen sus ventajas y desventajas. El acelerómetro puede medir la fuerza de la gravedad, y con esa información obtener el ángulo del robot, el problema del acelerómetro es que también puede medir el resto de las fuerzas a las que el vehículo es sometido, por lo que tiene mucho error y ruido. El giroscopio mide la velocidad angular, por lo que si se integra esta medida se obtiene el ángulo del robot, el problema de esta medida es que no es perfecta y la integración tiene una desviación, lo que significa que en poco tiempo la medida es buena, pero a largo plazo el ángulo se desviará mucho del real.

Esos problemas se pueden resolver con la combinación de ambos sensores, esto se llama fusión del sensor, y hay varios métodos para hacerlo, los dos más conocidos y usados son: filtro de Kalman, y el filtro complementario.

- El filtro de Kalman es un algoritmo muy extendido en robótica, ofrece un buen resultado, pero a costa de una alta complejidad y coste computacional. Hay una biblioteca para Arduino que implementa este método.

- El filtro Complementario es una combinación de dos o más filtros que combina la información de diferentes fuentes y obtiene el mejor valor. Se puede implementar en una sola línea de código.

Primero se intentó utilizar el filtro de Kalman, pero no se obtuvieron buenos resultados, el ángulo se calculaba con un poco de retraso y afectó al control. El filtro de Kalman tiene tres variables que se pueden cambiar basándose en el parámetro del sensor, y variando esto se pueden obtener un mejor resultado, se trató cambiando esos valores, pero no se obtuvieron mejores resultados así que se implementó el filtro complementario, mucho más fácil y tiene menos coste computacional. El filtro complementario funciona bien (Higgins, 1975).

Hay que tratar de posicionar el sensor IMU (o acelerómetro) en la línea del eje de los motores porque si se posiciona la IMU de forma distante esto puede generar mucho error en la medida del acelerómetro; recordar que mide la aceleración lineal, si se le ubica a una distancia R desde el eje cuando el robot cae vertical, la aceleración del acelerómetro es la gravedad más $R * dAngle/dt$ lo que significa que introduce un error en la medición.

2.4.1 Filtro complementario.

Como se dijo en el epígrafe anterior, mientras que se puede derivar la inclinación usando apenas un acelerómetro, sus medidas son propensas al error en el corto plazo, debido a la aceleración horizontal del robot, por lo tanto, se precisa promediar las mediciones a través del tiempo (filtro paso bajo) para obtener una lectura más precisa a largo plazo, pero también una que tenga latencia significativa. Por otro lado, la integración de las medidas de giroscopio es un muy buen predictor de la inclinación en el corto plazo, pero tiene una tendencia significativa a largo plazo. Debido a que el giroscopio es bueno en el corto plazo y el acelerómetro es bueno a largo plazo, se unen ambas mediciones en un promedio ponderado y en esto consiste básicamente el filtro complementario (Higgins, 1975).

En cada paso, el filtro complementario toma el ángulo calculado en el paso anterior, lo añade a las lecturas integradas del giroscopio para el paso actual, y lo promedia con el ángulo derivado del acelerómetro a través de un cálculo $arctan$ simple en las

componentes del vector de la aceleración. Los pesos ponen más énfasis en la porción derivada del giroscopio para reducir la latencia (Martin & Del Rio, 2013).

Es un filtro simple, fácil de implementar y sintonizar experimentalmente y demanda muy poco poder de procesamiento. Es básicamente un filtro de paso alto y un filtro de paso bajo combinado donde el paso alto actúa sobre el giroscopio y el paso bajo actúa sobre el acelerómetro para la corrección de la referencia absoluta de la estimación del ángulo (**Figura 2.9**) (Gaydou, 2011).

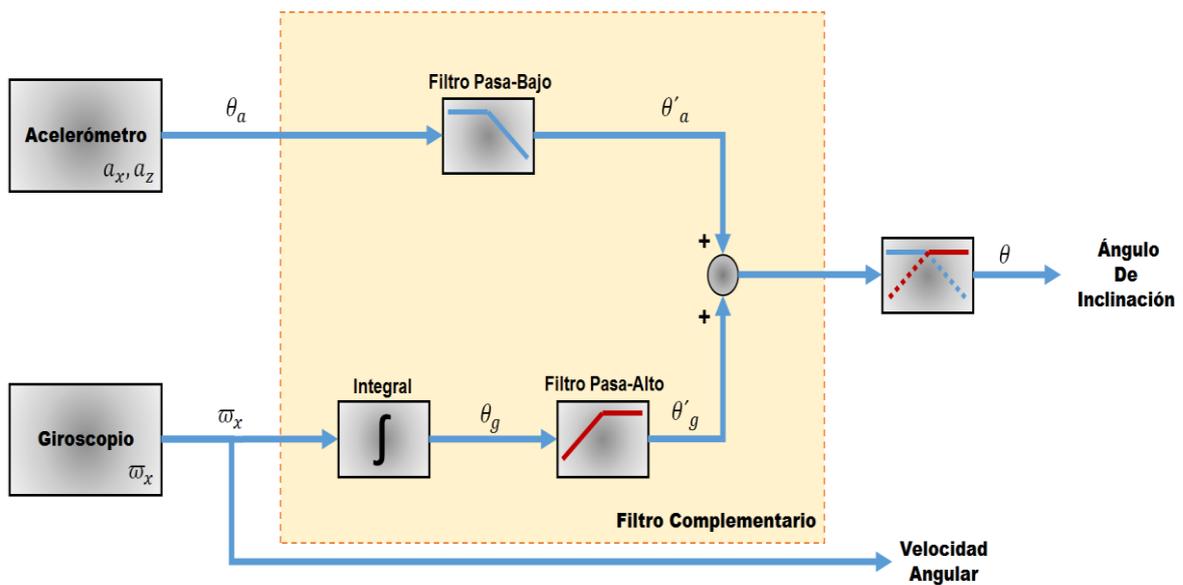


Figura 2.9: Diagrama de la fusión de los datos del acelerómetro y giroscopio mediante filtro complementario.

El ángulo entonces es dado por:

$$\psi_k = (1 - \alpha)(\psi_{k-1} + \psi_{k,gyro} dt) + \alpha\psi_{k,acc} \quad (2.27)$$

Donde dt es el tiempo de muestreo y α es una constante de filtro. Entonces, sintonizando la constante hasta que el resultado sea bueno, se cambia la constante de tiempo del filtro y se elimina el sesgo del giroscopio. Este filtro es bueno para dar una buena estimación del ángulo, sin embargo, hay algunos inconvenientes donde el más significativo es que mientras que elimina el sesgo de la estimación de ángulo, no da ninguna estimación del sesgo real del giroscopio (Gaydou, (2011); Higgins, (1975)).

2.5 Control PID.

Nuestro diseño de robot auto-equilibrado es esencialmente un péndulo invertido, que es un péndulo con su centro de masa por encima del punto de pivote. Equilibrar un péndulo invertido es un desafío, porque es inherentemente inestable. La menor perturbación de la posición de equilibrio resulta en una fuerza alejada del equilibrio que desestabiliza aún más el sistema. Por lo tanto, mantener el equilibrio en un equilibrio inestable requiere un control preciso y de baja latencia para corregir instantáneamente cualquier error de inclinación en el instante en que sucede.

Para hacer frente a este problema, se emplea un controlador PID que utiliza la retroalimentación de inclinación para controlar el par de los motores y mantener el robot equilibrado. El controlador PID mide continuamente la variable de proceso (inclinación del robot) y calcula un valor de error (ángulo desde la vertical), que es la desviación de la variable de proceso de algún valor ideal deseado (0° respecto a la vertical). El controlador intenta minimizar este error en el tiempo ajustando continuamente una variable de control (par del motor) de acuerdo con la **ecuación 2.28** de control PID donde $u(t)$ es la variable de control y $e(t)$ es el error en la variable de proceso (Huerta, 2014).

Matemáticamente el control PID (**Figura 2.10**) se expresa de la siguiente manera:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.28)$$

Donde K_p , K_i y K_d representan los parámetros proporcionales, integrales y derivativos, respectivamente. El parámetro proporcional actúa como multiplicador y produce una salida que es proporcional a la medición del error de corriente. El parámetro integral representa la acumulación de errores pasados. Un K_i alto actuará para resistir incluso el menor cambio de movimiento. Dado que se basa en errores pasados, puede hacer que el valor presente sobrepase el punto deseado. El parámetro derivativo es la pendiente del error en el tiempo y efectivamente trabaja para amortiguar cualquier corrección grande que de otro modo podría

sobrepasar el punto de ajuste. Los valores de K_d grandes también ralentizarán mucho la respuesta de corrección (Yamamoto, 2009).

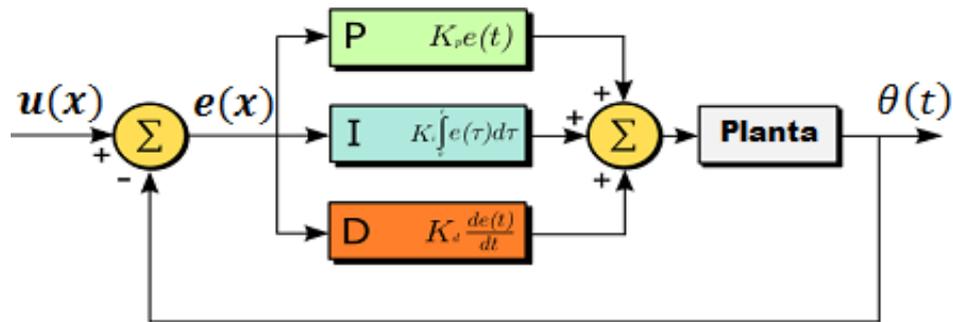


Figura 2.10: Diagrama de control PID.

Acción proporcional: Un valor alto provocará una fuerte reacción contra un cambio de actitud. Por encima de un cierto valor el sistema comenzará a oscilar, el punto ideal es justo debajo de este punto. No se puede balancear un robot con un valor proporcional de 0. El control proporcional solo es mucho mejor que el ON/OFF puro, pero el robot mantendrá oscilando y finalmente caerá sobre el piso.

Acción derivativa: La parte derivativa calcula la rapidez con que se produce un cambio de ángulo. Con el robot balancín, estos valores suelen usarse como un factor de amortiguación, lo que significa signos negativos en la fórmula. Sin la acción derivada, no hay amortiguación para disipar la energía del sistema. Con sólo control proporcional, cualquier entrada al sistema causará una oscilación no amortiguada que continuará para siempre. El término derivativo funciona de la forma más rápida, ya que detecta un cambio en la velocidad antes incluso de que aparezca un error significativo.

Acción integral: El término integral permite un establecimiento preciso en el *setpoint*, es conocido como "error de estado estacionario". Es el único término que sigue cambiando, no importa cuán pequeño sea el error. Básicamente le está diciendo al regulador, "si no estás consiguiendo mantener el ángulo, incrementa la velocidad durante un periodo hasta que lo consigas".

El resultado final del PID y el filtro complementario es limpiar lo que de otro modo sería una señal ruidosa. La señal del acelerómetro depende de la fuerza gravitatoria que se siente en cada eje. Cuando el robot se cae, mostrará una aceleración hacia el suelo. Del mismo modo, como la caída se corrige, mostrará la aceleración lejos

del piso. Si la aceleración lejos del piso es bastante grande, la señal del acelerómetro parecerá como si el robot haya sobre-corregido grandemente. Esto es malo para cualquier equilibrio estable. Los dos procedimientos se encargarán de este problema (Martin & Del Rio, 2013).

2.5.1 Sintonización manual del controlador.

Para la sintonización manual, primeramente, se ponen las tres constantes a cero, luego se aumenta K_p hasta que se produzca la oscilación. A continuación, ajustar K_d hasta que el sistema esté amortiguado críticamente, es decir, hasta que la oscilación desaparezca. A continuación, aumentar K_i hasta que el error en estado estacionario pase a cero en un tiempo razonable. Se evitará que se caiga dando aceleración a las ruedas según su inclinación desde la vertical.

Un robot simplista se inclina en la dirección del movimiento. Esto funciona por un corto tiempo, pero el robot se acelera y pronto se cae. Si el robot intenta enderezarse, el movimiento hacia adelante se detiene. En su lugar, se debe avanzar mientras se enrolla verticalmente. El primer paso es hacer que las ruedas giren a la velocidad deseada, dejando suficiente potencia para mantener el robot equilibrado y perfectamente erguido (Martin & Del Rio, 2013).

Ver en el **Anexo 2** diagrama de flujo donde se demuestra cómo se realiza el proceso de control PID en el compilador Arduino.

2.6 Resultado final y pruebas experimentales.

Una vez estudiado el tema de los péndulos invertidos, definida la estructura del chasis, seleccionados los componentes, hechas las conexiones eléctricas (ver **Anexo 3**) y definido la estrategia de control a utilizar, se procedió al montaje y puesta en marcha del proyecto. El montaje final del robot con todos sus componentes se puede ver en la **Figura 2.11** y sus dimensiones en el **Anexo 4**.

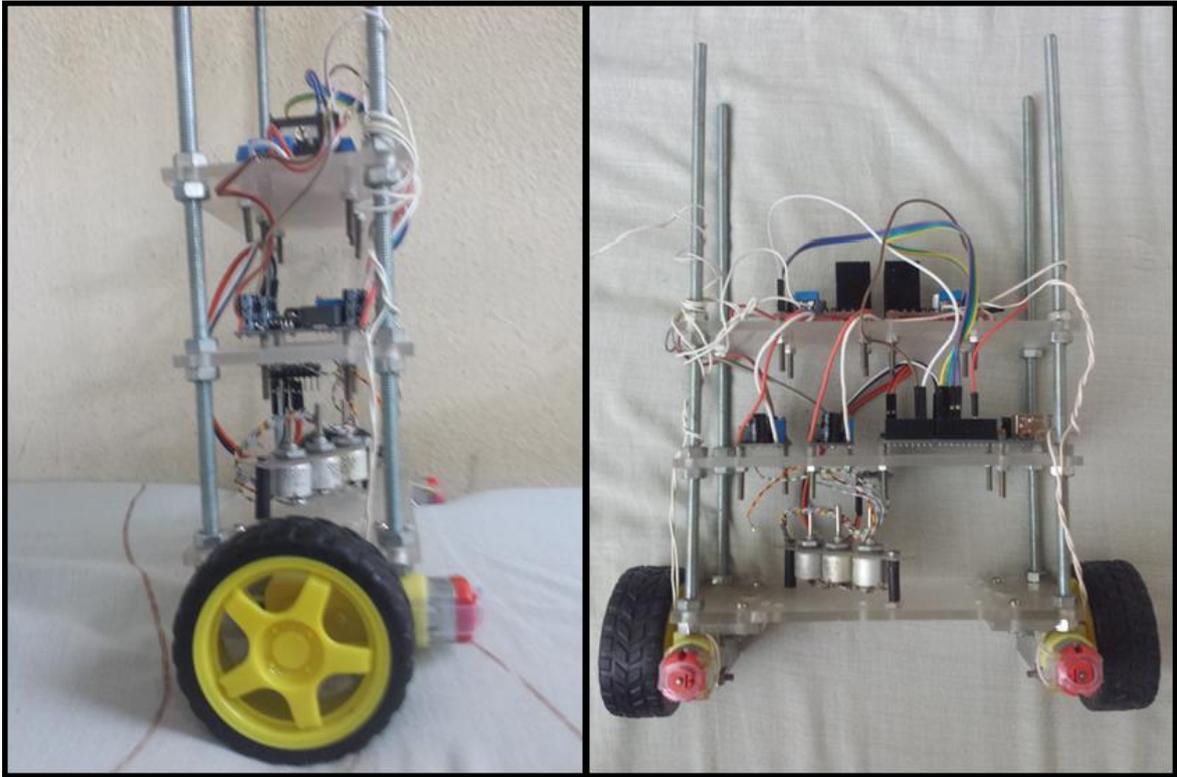


Figura 2.11: Robot finalizado a) Vista lateral b) Vista frontal.

Aquí es necesario mencionar que lograr el objetivo propuesto se convirtió en una tarea difícil y de obstáculos en el camino por cuestiones intrínsecas a la propia naturaleza de los componentes. Se pasó por varias fases y el proyecto fue sometido a muchos cambios necesarios para vencer esos obstáculos. Inicialmente fueron montados motores Paso a Paso de diferentes características, pero se pudo comprobar que este tipo de motores no es adecuado para este tipo de aplicación ya que se necesita de una altísima velocidad de respuesta y los motores Paso necesitan que continuamente se le envíen los nuevos comandos para transitar al próximo paso; esto provoca que se cree un conflicto a la hora de tomar las mediciones del sensor, ejecutar las funciones para filtrado, el algoritmo PID, etc. Como resultado, al ejecutar todas estas funciones mencionadas anteriormente, no se puede hacer al mismo tiempo el procedimiento para mover a los motores y esto resulta en que la velocidad de respuesta sea excesivamente lenta y el robot caiga a los pocos milisegundos haciendo prácticamente imposible su control. Aun probando una librería para Arduino para procedimientos "multitarea", este comportamiento se mantiene.

Estas experiencias prácticas, más las recomendaciones en la bibliografía estudiada de usar siempre motores de CD, hicieron que se decidiera optar por esta variante. Los motores de CD son menos adecuados para aplicaciones que requieran un alto nivel de precisión en la posición, pero tienen la ventaja de que su control es mucho más sencillo que los de paso. En este caso esta ventaja es muy útil ya que hace posible reducir el tiempo de respuesta de todo el sistema.

Para el control de velocidad de estos motores se emplea la funcionalidad PWM del Arduino (ver **epígrafe 2.3.3**) como vía para emular una salida analógica. Usando una librería para tales fines, valores digitales entre 0-255 se pueden ser entendidos como valores analógicos entre 0-5 V a la salida. Este voltaje llega a los *Drivers* que, a su vez, incrementando la corriente, alimentan a los motores con un voltaje variable (para variar su velocidad) produciendo de esta manera el movimiento. La ventaja del uso de este mecanismo es que, en el Arduino, al enviar un valor determinado mediante PWM a la salida (y por ende a los motores), no es necesario refrescarlo constantemente, esto da la posibilidad de ir ejecutando los demás algoritmos de medición y control sin que se afecte la alimentación de los motores. Fueron varios los motores y mecanismos de reducción usados con resultados no tan satisfactorios en la mayoría de los casos hasta que fue posible adquirir el modelo unificado Motor-Engranaje-Rueda mostrado en el **epígrafe 2.3.4**. Con este se obtuvieron los mejores resultados.

Se realizaron numerosas pruebas experimentales en las cuales se modificaron múltiples parámetros tratando de acercarse a la mejor respuesta posible. Se alteraron las distancias entre los diferentes niveles del chasis para variar los efectos de la gravedad, el centro de masa, inercia y punto de equilibrio. Se ubicó el sensor de inclinación a diferentes alturas del suelo para cambiar la influencia del momento de inercia y se comprobó que el mejor lugar para el mismo es lo más cercano al suelo porque se ve menos afectado por el desplazamiento lineal del sistema y se disminuyen los efectos del ruido en sus mediciones. También se hicieron numerosos ajustes a los parámetros (K_p , K_i y K_d) del controlador ya que estos son fundamentales en el tipo de respuesta que tendrá el sistema. No obstante, a pesar de que con los motores de CD elegidos se mejora la respuesta, se mantenían

algunas restricciones que imposibilitaron que se lograra 100 % el objetivo perseguido, aunque no precisamente por el factor humano.

En la mayoría de los casos, las mediciones del ángulo y su fusión mediante el filtro complementario se ejecutan sin problemas y con buenos resultados. El Arduino ejecuta correctamente el algoritmo de control respondiendo siempre de la manera esperada para evitar la caída. Sin embargo, persisten algunas limitaciones relacionadas con la calidad e algunos de los elementos y sus propiedades físico-mecánicas intrínsecas que atentan contra el desempeño esperado. En ocasiones el acelerómetro-giroscopio se “congelaba” y no devolvía más mediciones, pero sobre todo la respuesta de los motores no es la más acertada. Todo el procesamiento y respuesta debe hacerse en cuestión de pocos milisegundos y se comprobó que, aunque el algoritmo hace lo que tiene que hacer, la respuesta no es lo suficientemente rápida para garantizar la estabilidad por largo periodo. En algunos cortos intervalos de tiempo se logra cierto nivel de equilibrio, pero eventualmente se produce la caída cuando los motores no son capaces de suministrar el par mecánico y la velocidad requeridas. Se considera que, simplemente sustituyendo estos actuadores por otros con características más adecuadas, se puede lograr mantener el equilibrio de manera satisfactoria. Esto queda como recomendación para próximas modificaciones.

2.7 Análisis Económico.

Para tener una idea del precio total del proyecto se hace un listado resumen del costo de cada uno de los componentes como se muestra en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5: Listado de precios de componentes utilizados.

Componente	Precio(USD)	Cantidad	Total
Arduino UNO	4.50	1	4.50
IMU GY-85	10.70	1	10.70
<i>Driver</i> L298N	8.95	2	17.90
Regulador LM2596	2.00	2	4.00
Motor con caja reductora	6.85	2	13.70

Elementos del chasis	3.80	1	3.80
TOTAL			54.60

Partiendo de estos datos se puede apreciar que para llevar a cabo este proyecto el costo no excedió de los 55 dólares lo cual es considerablemente bajo teniendo en cuenta la complejidad de cada uno de estos componentes. Esto lo convierte en un proyecto viable para su implementación y posterior ampliación en el ámbito docente e instituciones de bajos recursos como la Universidad de Oriente y abre nuevos horizontes para el desarrollo de la robótica en el Departamento de Automática.

Conclusiones parciales.

- Se realizó la modelación matemática hasta obtener el modelo representativo del péndulo invertida.
- Se realizaron las conexiones eléctricas para la comunicación entre todos los circuitos componentes del sistema.
- Se eligió el método adecuado para la medición del ángulo de inclinación a través de la fusión mediante un filtro complementario entre las mediciones del acelerómetro y el giroscopio.
- Se programó una estrategia de control PID para el control de la inclinación.

CONCLUSIONES

- Se estudiaron y dominaron conceptos importantes referentes a la teoría del péndulo invertido.
- Se logró diseñar e implementar un Robot Balancín que servirá de apoyo a la docencia en la disciplina de control específicamente en la asignatura de robótica
- La adecuada selección de los componentes mecánicos juega un papel fundamental en los sistemas auto-balanceados debido a que la estabilización de la plataforma depende del movimiento y reacción adecuada de cada elemento que interactúa con el sistema.
- Se comprobó la importancia de la corrección de la medición del ángulo por medio del filtro complementario.
- Este prototipo permite la simulación de distintos tipos de controladores, gracias a su versatilidad en la parametrización y sintonización de las variables que lo rigen.

RECOMENDACIONES

- Para el problema con la demora en los cálculos del controlador, usar alguna de las librerías existentes para Arduino para trabajo multitarea.
- Implementar un módulo de comunicación inalámbrica para interacción con un operador y transmisión de datos en tiempo real para su posterior análisis.
- Probar otros algoritmos de control además del PID para tratar de mejorar la estabilidad y respuesta.
- Incorporar algún mecanismo de seguimiento de trayectoria teledirigida.

BIBLIOGRAFIA

- Aracil, J., & Gordillo, F. (2005). El Péndulo Invertido. Un Desafío para el Control no Lineal. 2, 8-19.
- Arvidsson, M., & Karlsson, J. (2012). *Design, construction and verification of a self-balancing vehicle*. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Bageant, M. R. (2011). *Balancing a Two-Wheeled Segway Robot*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Bogdanov, A. (2004). *Optimal control of a double inverted pendulum on a cart*. OGI School of Science and Engineering.
- Bonafilia, B. (2009). *Self-balancing two-wheeled robot*. Chalmers University of Technology, Department of Signals and Systems.
- Borbón, F., Rojas, J. A., & Víquez, D. (2003). *Aplicación de los sistemas de control en la robótica*. Monografía, Universidad de Costa Rica, Departamento de Automática, Costa Rica.
- Bräunl, T. (2006). *Embedded Robotics* (2nd ed.). Australia: Springer.
- Castro, A. (2012). *Modeling and Dynamic Analysis of a Two-Wheeled Inverted-Pendulum*. Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Chuan, H. (2015). *Balancing robot control and implementation*. Texas A&M University, Graduate and Professional Studies, .
- Evans, M., Noble, J., & Hochenbaum, J. (2013). *Arduino in Action*. Manning.
- Furuta, K., Nishihara, K., & Mori, S. (1976). Control of Unstable Mechanical Systems: Control of Pendulum. *International Journal of Control.*, 23, 673-692.
- Galban, I. A. (2014). *diseño e implementación de una placa controladora de un plataforma robótica móvil diferencial basada en los motores EMG30*. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Departamento de Automática y Programación, Habana, Cuba.
- García, F. J. (2011, Octubre). *Desarrollo e implantación de plataforma robótica móvil en entorno distribuido*. Proyecto de Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Gaydou, D. (2011). *Filtro complementario para estimación de actitud aplicado al controlador embebido de un cuatrorotor*. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
- Higgins, W. T. (1975). *A Comparison of Complementary and Kalman Filtering*. Arizona State University. Arizona, USA: IEEE Transactions on aerospace systems.

Housten, D. (2003). *Learning Roomba: Student's Guide Module 2 Robot Configurations*.

Huerta, G. R. (2014). *Control de un péndulo invertido sobre dos ruedas de tres grados de libertad*. Tesis de Ingeniería Mecatrónica., Universidad Nacional Autónoma de México., México, D.F.

Irigoyen, M. I. (2015). *Diseño e Implementación de Robot Segway*. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica., Pamplona.

Jadlovská, S., & Sarnovský, J. (2012). Classical double inverted pendulum - A complex overview of a system. *IEEE 10th International Symposium*.

Kafetzis, I., & Moysis, L. (2017). *Inverted Pendulum: A system with innumerable applications*. Aristotle University of Thessaloniki. Thessaloniki, Greece: 9th International Week Dedicated to Maths.

Lekshmy, S., Aleesha, G., & Athira, C. V. (2015). Self-Balancing Robot. *International Journal of Computer Engineering In Research Trends*.

Martin, B. A., & Del Rio, C. M. (2013). *Control de posición de un balancín con Arduino*. Tesis Ingeniería Técnico Industrial., Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid.

Muñoz, G. D. (2013). *Sistema de Control para un robot Self-Balancing*. Universidad Pedagógica Nacional., Facultad de Ciencia y Tecnología., Bogotá D.C.

Nawawi, S. W. (2008). *Real-Time Control of Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot*. World Academy of Science, Engineering and Technology.

Nawawi, S. W., Ahmad, M. N., & Osman, J. H. (2007). Development of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. *The 8th Student Conference on Research and Development*. Malaysia.

Ochoa, G. M. (2011). *Modelado y control de un robot equilibrista sobre una esfera*. Tesis en Ingeniería en Automática., Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

Pathak, K., Franch, J., & Agrawal, S. K. (2005). *Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization*. IEEE Transactions on robotics.

Pincin, & J, S. (2016). *Diseño, construcción y control de un Robot Balancín*. Proyecto integrador de Ingeniería Industrial., Centro Atómico Bariloche. Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo., Argentina.

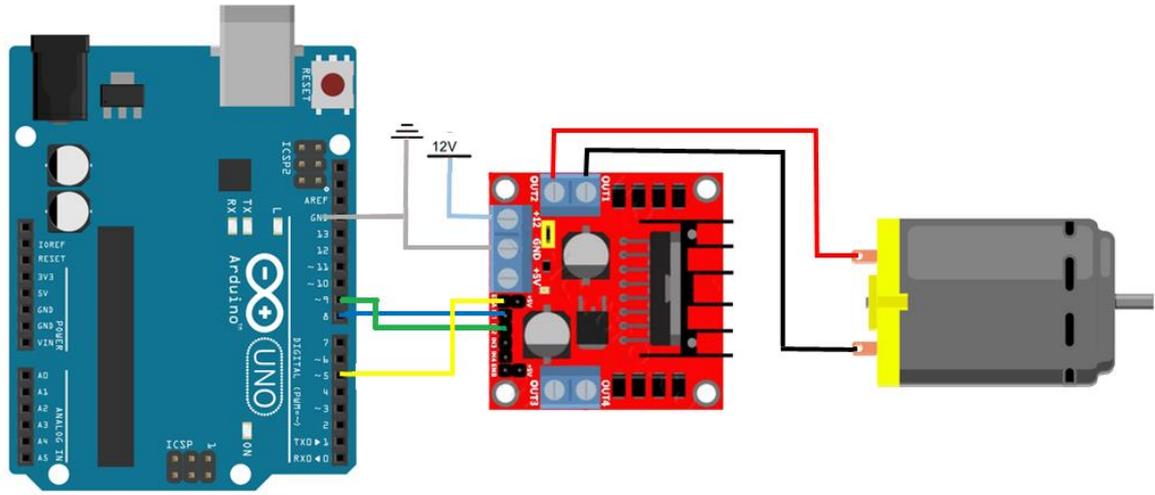
Ramírez, R. C. (2011). *Visión Computacional aplicada al control de un Robot Móvil*. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Automática., Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Habana, Cuba .

Ruiz del Solar, J., & Salazar, R. (2012). *Introducción a la Robótica*. Universidad de Chile, Chile, Perú.

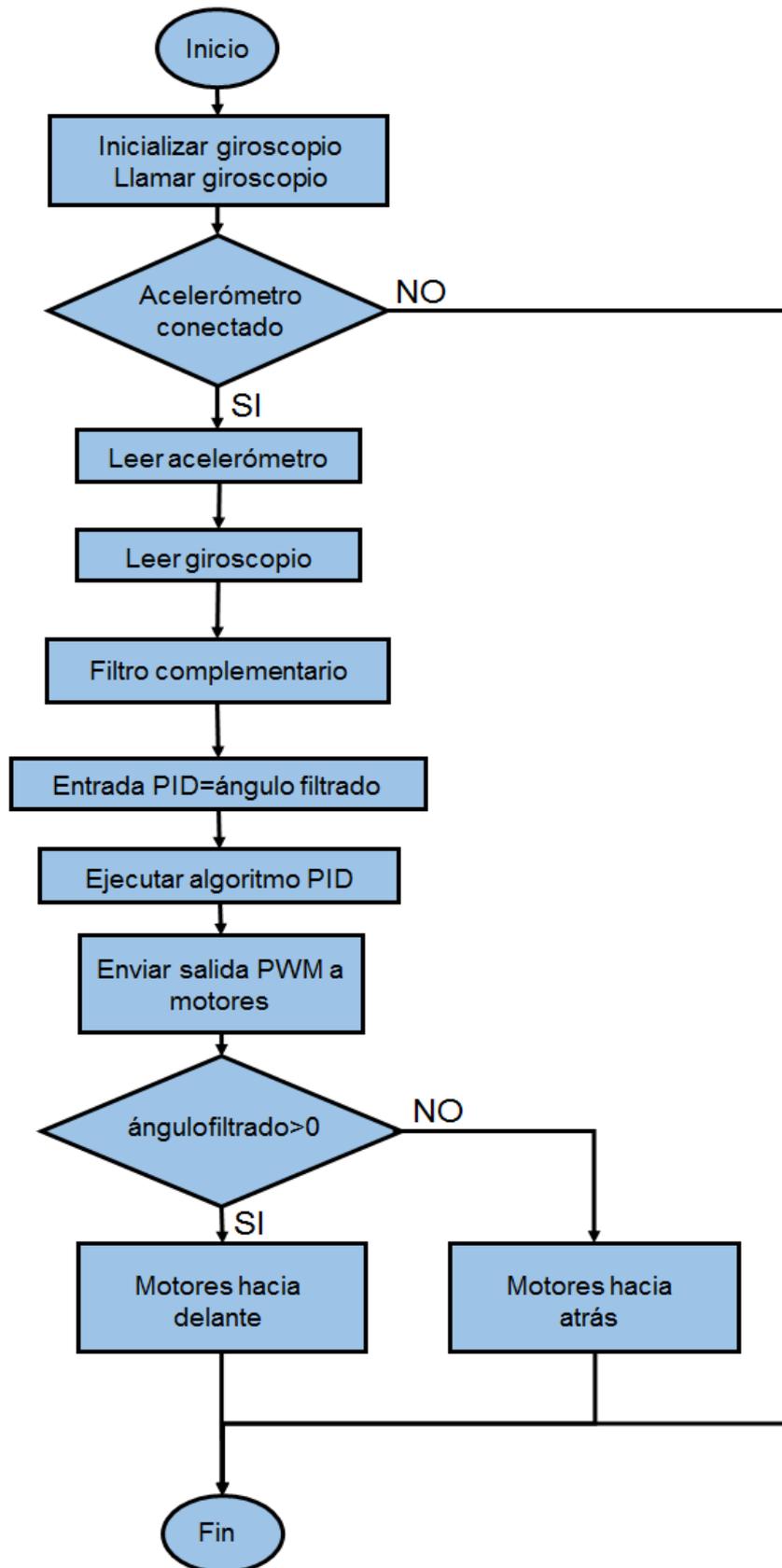
- Sanchez, H., Iñaki, A., & Patete, A. (2010). Construcción y Control de un Péndulo Invertido utilizando la Plataforma Lego MINDSTORMS NXT. *4to congreso iberoamericano CIBELEC 2010*.
- Seo, S. (2007). Simulation of Attitude Control of a Wheeled Inverted Pendulum. *International Conference on Control, Automation and Systems*. Seoul, Korea.
- Siciliano, G. O., Sciavicco, L., & Villani, L. (2008). *Robotics Modelling, Planning and Control*,. (1st, Ed.) Italy: Springer.
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press.
- Silva, R., García, J. R., Barrientos, V. R., & Molina, M. A. (2014). Una Panorámica de los Robots Móviles. (3, Ed.) *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*.
- Sundin, C., & Thorstensson, F. (2012). *Autonomous balancing robot; Design and construction of a balancing robot*. Master of Science Thesis, Göteborg, Sweden.
- Yamamoto, Y. (2009). *NXTway-GS Model-Base Design - Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT*.
- Young, S. S. (2003). Attitude Estimation Using Low Cost Accelerometer and Gyroscope Proceedings KORUS 2003. *The 7th Korea-Russia International Symposium*, 2, pp. 423-427.

ANEXOS

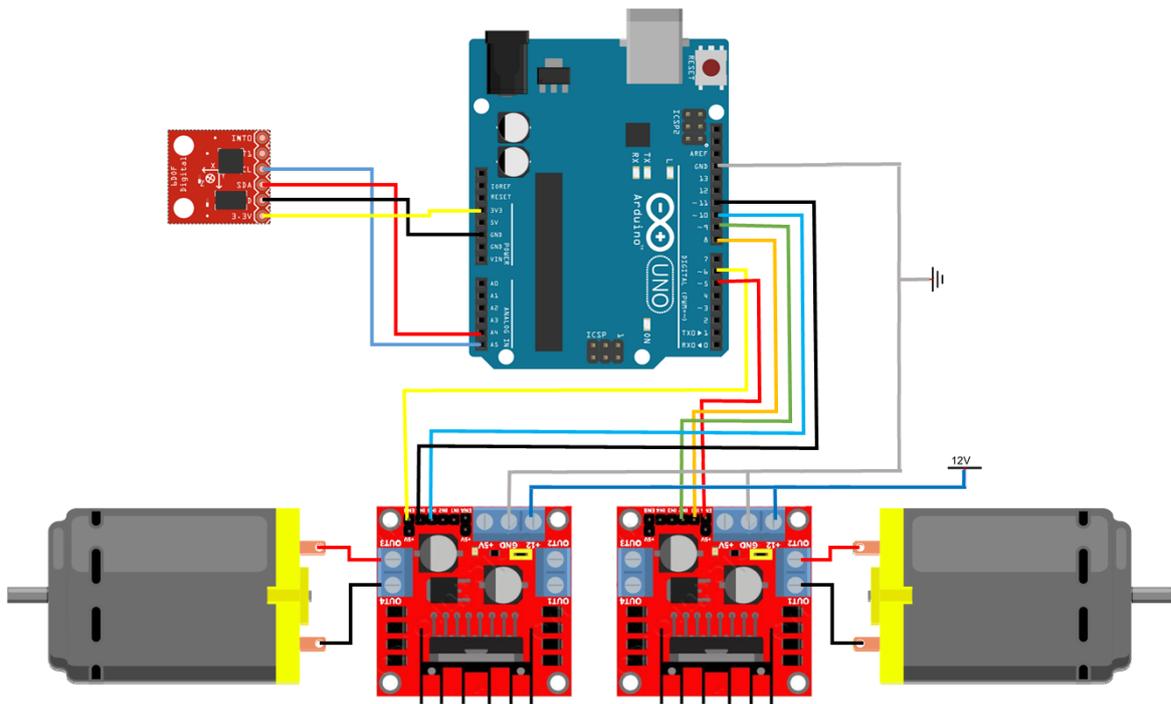
Anexo 1: Diagrama de conexiones eléctricas del *Driver* L298N



Anexo 2: Diagrama de flujo de los pasos involucrados en el control.



Anexo 3: Diagrama de conexiones eléctrica generales



Anexo 4: Dimensiones finales del robot.

