REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"LA CIENCIA AL SERVICIO DEL HOMBRE"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE UN EJE UNIPERSONAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

BRAHAYAM DAVID PONTÓN JUNES
CHRISTIAN SANTIAGO ARMIJOS PALADINES

DIRECTOR: MSc. PATRICIO BURBANO

Quito, Septiembre 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, Brahayam David Pontón Junes y Christian Santiago Armijos Paladines, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Brahayam David Pontón Junes

Christian Santiago Armijos Paladines

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Brahayam David Pontón Junes y Christian Santiago Armijos Paladines, bajo mi supervisión.

MSc. Patricio Burbano

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a Dios, a nuestros padres, hermanas y familiares por su comprensión y apoyo incondicional durante nuestra vida.

Al MSc. Patricio Burbano por su respaldo, guía y apoyo constante para la realización de este proyecto.

Al Ing. Carlos Velasco, Ing. Victor Castañeda, Economista Paulina Callejas, Ing. Juan Galarza por su colaboración en el desarrollo de este prototipo.

Y a todas aquellas personas que de alguna manera nos han apoyado para la culminación de este proyecto.

Brahayam Pontón, Christian Armijos

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, aquel Ser Celestial que me ha dado la fuerza para salir adelante y la dicha de poder verlo hoy terminado. Además, quisiera expresar todo mi agradecimiento a mi maravillosa familia que me ha apoyado en mi caminar y ha sido mi fuente de afecto y cariño.

A mi madre, que con su ayuda en momentos buenos y malos, me ha enseñado que el caer es solo una oportunidad más para levantarse y buscar llegar a la cima de la montaña, sin dejar de ver el panorama que es la belleza del mundo iluminada por la esperanza.

A mi padre, que ha confiado y ha creído en mí. Razón por la cual se ha esforzado tanto para darme una carrera, buscando que el futuro me sonría y que sea capaz de enfrentar al mundo de la mejor manera posible y con las armas más eficaces que son el conocimiento y los valores que me ha inculcado junto con mi madre en el transcurso de mi vida.

A mi hermana, con la cual siempre he podido y podré contar para todo y en todo momento. Gracias por ser esa personita tan especial.

Agradezco también a mis profesores, que me han dado las bases para que mi proyecto se vuelva una realidad y que a lo largo de estos seis años de estudio han dejado en mi corazón huellas imborrables.

Quisiera recalcar lo importante que es la compañía y el apoyo de los seres queridos pues son el motor fundamental y la sal que le da sabor al día a día.

A un gran amigo, de quien he tenido un apoyo incondicional y ha sabido llegar a mi corazón por su forma de ser. Gracias Christian.

Estas últimas líneas las he reservado para algo muy sublime, la más bella manera de exteriorizar lo que sentimos, nuestros sueños y nuestras ideas, la poesía, a través de la cual quiero expresar mi agradecimiento en su máxima expresión.

Hoy te agradezco Dios por mi vida
Gracias por brindarme una familia
Anhelo que en mi mente estés por siempre
Dejándome reír entre mi gente.

Tengo una dicha tan grande en este día
De haber vuelto realidad mi fantasía
De haber cristalizado con esfuerzo
Todos mis sueños, mis proyectos.

A mi padre, mi madre y mi hermanita
Que me han apoyado sin medida
Y me han entregado su ternura y su alegría
Por verme realizado y sonriente.

No tengo palabras para expresar
Lo orgulloso que me siento por tenerlos
Porque son algo único y maravilloso
Que no se borrará de mi pensamiento.

Ahora que culmino finalmente
Mi paso por esta etapa de la vida
Miro atrás y no me arrepiento
Todo lo hecho por convencimiento.

Hubo momentos de inmensa dicha
Y otros en los que no encontraba salida
Pero con fe, esperanza y valentía
He olvidado todo lo malo que había.

Gracias por respirar el aire que respiro
Y gracias por soñar lo que he soñado
Gracias por tener lo que he tenido
Y gracias por haber sido tan amado.

Brahayam David Pontón Junes

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo de este trabajo primero a Dios que con su mano invisible ha sabido llegar a mi corazón y me ha enseñado que todo es posible en esta vida si trabajas con dedicación, amor y mucha fe.

Lo dedico a mis padres que supieron siempre ayudarme a salir adelante frente a cualquier obstáculo con palabras de experiencia y optimismo que valiente y merecidamente han ganado por el caminar de sus vidas.

Lo dedico a mis hermanas porque las quiero mucho y agradezco a Dios por tenerlas a mi lado.

Y por último y no por eso menos importantes lo dedico a todas esas personas que confiaron en mí y me dieron la oportunidad para salir adelante como lo hizo mi amigo y compañero de este proyecto. Gracias Brahayam

Christian Santiago Armijos Paladines

RESUMEN

En el presente proyecto se diseña, construye y controla un vehículo eléctrico unipersonal de un eje. El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo del controlador de estabilidad del vehículo; por lo tanto, es necesario recalcar que no se realiza el diseño de los controladores de potencia de los motores, sino que se adquieren controladores comerciales capaces de manejar los motores aquí empleados.

Se usa como fuente de energía 2 baterías en serie que alimentan 2 motores DC, encargados de transportar y mantener estable a una persona. Motores, baterías y demás elementos que integran el vehículo se encuentran apoyados en una estructura metálica lo suficientemente robusta para lograr su estabilización y dimensionada de tal modo que permita la movilidad por exteriores en planos horizontales e incluso por lugares con pendientes pequeñas. Además da al usuario seguridad y facilidad de maniobra.

El sistema de control del vehículo trabaja con un sensor de inclinación que envía datos del valor del ángulo y la velocidad angular por comunicación serial al microcontrolador, el cual se encarga de controlar los motores que proveen la aceleración necesaria para mantener el equilibrio del vehículo. El microcontrolador principal recibe también los datos de un microcontrolador auxiliar, el cual está encargado de recibir los comandos de giro y aceleración adicional dados por el usuario a través de la señal de 2 pulsadores.

El programa es desarrollado en lenguaje C, se implementa un PID como algoritmo de control, el cual fue en primer lugar calibrado con un PC y posteriormente ajustado finamente en función del comportamiento observado del prototipo.

Finalmente, una vez alcanzada la madurez en la integración de los distintos componentes electrónicos, eléctricos y mecánicos, se tiene como resultado un vehículo funcional.

PRESENTACIÓN

Ante la inevitable e imprescindible necesidad actual de las personas por ahorrar energía para disminuir la contaminación y evitar los largos atascamientos vehiculares en grandes ciudades; dirigentes, líderes, científicos, ambientalistas y economistas han tenido la clara visión de ingresar al mundo del transporte de los vehículos que usan energía eléctrica, la cual es más barata, renovable y bastante accesible a un importante sector poblacional parte del mundo; por lo que es importante la presencia de medios que ayuden a materializar estas inquietudes.

El presente proyecto inicia mostrando la evolución del vehículo en prototipos similares que se han venido implementando en otros países. Se verán definiciones importantes para la estabilización como también técnicas y procedimientos de la teoría de control usada en su desarrollo.

Se analiza el detalle técnico de los elementos que integran el vehículo tanto dispositivos eléctricos (controladores de potencia comerciales, sensores, entre otros) como mecánicos (acoples motor-llanta y estructura metálica) para entender su importancia y el uso que se los da en la construcción del prototipo.

En seguida se presenta las bases de software necesarias para la investigación, diseño y control de estabilidad del vehículo. Donde se detallan las configuraciones, procedimientos de acción y diagramas de flujo que albergan la lógica del sistema de control realizado. Se termina viendo los resultados obtenidos junto con los detalles financieros de costos en la construcción.

Para terminar se tiene las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de este proyecto como algunas recomendaciones para futuras mejoras y aplicaciones.

CONTENIDO

RESUMEN ..... **VIII**

PRESENTACIÓN ..... **IX**

MARCO TEÓRICO **1**

1.1 INTRODUCCIÓN 1

1.1.1 RESEÑA HISTÓRICA *1*

1.1.2 DEFINICIÓN DE VEHÍCULO ELÉCTRICO UNIPERSONAL DE UN EJE *1*

1.2 PROBLEMA DE CONTROL 2

1.2.1 VARIABLES EXTERNAS *3*

1.2.2 FILTRO KALMAN *4*

1.2.3 MOTORES *5*

1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE CONTROL 6

1.3.1 DESCRIPCIÓN Y MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA *6*

1.3.2 MODELO DEL SISTEMA *7*

1.3.3 SISTEMA DE TRACCIÓN DIFERENCIAL *7*

1.3.4 RESTRICCIONES NO HOLÓNOMAS *8*

1.3.5 CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN (CIR) *8*

1.3.6 SISTEMA DE PENDULO INVERTIDO SOBRE MÓVIL *10*

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO **23**

2.1 SISTEMA MECÁNICO 23

2.1.1 BATERÍAS *23*

2.1.2 ADAPTADOR EJE-RUEDA *27*

2.1.3 LLANTAS *28*

2.1.4 MOTORES *29*

2.1.5 TORNILLOS DE SUJECCIÓN *35*

2.2 SISTEMA ELECTRÓNICO 35

2.2.1 UNIDAD INERCIAL DE NAVEGACIÓN *35*

2.2.2 CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA MOTORES DC *39*

2.2.3 EQUIPO AUXILIAR: CARGADOR DE BATERIAS *41*

2.2.4 PROTECCIONES: FUSIBLES Y BREAKER *42*

2.2.5 ENCODER DE CUADRATURA *42*

2.2.6 MICROCONTROLADORES *44*

2.2.7 LCD (LIQUID CRYSTAL DISPLAY) *47*

2.3 INTEGRACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL VEHÍCULO 48

2.3.1 MONTAJE DE LA ESTRUCTURA 48
2.3.2 MONTAJE DEL HARDWARE 53
DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL 64
3.1 CONDICIONES DE SOFTWARE 64
3.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL SELECCIONADO: CODEVISION AVR 65
3.3 PROGRAMADOR: AVR DRAGON....67
3.3.1 INTERFACES DE PROGRAMACIÓN....67
3.3.2 INTERFACES DE EMULACIÓN 67
3.4 COMUNICACIÓN Y CONEXIÓN CON EL SENSOR DE INCLINACION IMU....68
3.4.1 CONFIGURACIÓN INICIAL DEL SENSOR IMU POR MEDIO DE LA COMPUTADORA 68
3.4.2 CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA Y MANUAL DEL SENSOR DE INCLINACIÓN 72
3.4.3 TRAMA DE DATOS....74
3.4.4 COMUNICACIÓN SERIAL CON LOS MICROPROCESADORES 76
3.5 DIAGRAMAS DE FLUJO....78
3.5.1 ATMEGA644P 78
3.5.2 ATMEGA8....87
3.6 MANEJO DE LINK SIMMECHANICS PARA OBTENER EL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL....91
3.6.1 PASOS EN MATLAB: 92
3.6.2 PASOS EN SOLIDWORKS: 93
3.7 CONTROL DE EQUILIBRIO CON CONTROLADOR PID 97
3.7.1 RESPUESTA INICIAL DEL SISTEMA 97
3.7.2 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL AUTOMÁTICAMENTE GENERADO....99
3.7.3 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR PID CALIBRADO 102
PRUEBAS Y RESULTADOS 105
4.1 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CONTROLADOR OSMC 105
4.2 INSTRUMENTACIÓN Y SENSORES....105
4.3 CONTROL DE ESTABILIDAD....106
4.4 PRUEBA DE GIRO 108
4.5 PRUEBA DE ACELERACIÓN 109
4.6 ESPECIFICACIONES 109
4.7 ANALISIS DE COSTOS – PRESUPUESTO....110
4.4.1 COSTO DE MATERIALES....111

4.4.2 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....113
4.4.3 COSTO DE INGENIERÍA.....113
4.8 VEHÍCULO ELÉCTRICO UNIPERSONAL DE UN EJE TERMINADO.....114
4.9 VIDEO.....114
CONLUSIONES Y RECOMENDACIONES 115
5.1 CONCLUSIONES.....115
5.2 RECOMENDACIONES 118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....119
ANEXOS 122

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 RESEÑA HISTÓRICA

La historia de los vehículos auto balanceados nace con el famoso inventor y empresario Dean Kamen que patentó su vehículo de transporte ligero eléctrico de dos ruedas como SEGWAY en Diciembre del 2001 [1]. Actualmente Segway comercializa 2 líneas del vehículo autobalanceado, uno para recorrer las calles de ciudades (modelo i2) y otro tipo todo terreno (modelo x2) [2].

Después de esto se presentaron diferentes modelos de vehículos autobalanceados como el Scooter hecho por el estadounidense Trevor Blackwell en el 2002 y mejorado el año 2005, el cual era una versión bastante similar, pero lo más importante a un menor costo, ya que solo usaba un sensor por cada variable. Algunas otras personas y grupos han trabajado en el desarrollo de este nuevo tipo de vehículos ya sea en proyectos de investigación o en proyectos de titulación.

En el país todavía no se ha realizado un prototipo de este tipo de transporte, y es importante para los idealizadores de este proyecto que se lo considere como una alternativa para mejorar el tráfico, el medio ambiente y finanzas de las personas.

1.1.2 DEFINICIÓN DE VEHÍCULO ELÉCTRICO UNIPERSONAL DE UN EJE

Es un vehículo que integra una red inteligente de sensores, ensamblajes mecánicos y un sistema de control que le permite a una persona movilizarse, esto se realiza mediante el control de dos motores que se encargan de mantener la estabilidad del vehículo teniendo como punto de apoyo dos llantas [3]. También

definido como vehículo que transporta a una sola persona controlado según la inclinación del cuerpo.

Este vehículo nace como una alternativa de transporte amigable con el medio ambiente para cortas distancias. Es un transporte eficiente que no tiene emisiones tóxicas porque trabaja con electricidad obtenida de fuentes de energía renovable [4].

1.2 PROBLEMA DE CONTROL

En una vista general del prototipo, éste cuenta solo con dos puntos de apoyo, que son sus dos llantas. Las cuales no son suficientes para asegurar una buena estabilidad como lo serían 3 puntos de apoyo. Por tanto el problema de control de este vehículo es su inestabilidad.

Debido a la gran influencia que tiene la ubicación del centro de gravedad en la estabilidad del vehículo, debe ser tomada en cuenta al diseñar el prototipo, por ello se presenta su definición.

"Centro de gravedad de un cuerpo es el punto respecto al cual las fuerzas que la gravedad ejerce sobre los diferentes puntos materiales que constituyen el cuerpo producen un momento resultante nulo". [5]

El centro de gravedad de un cuerpo no es posible medirlo directamente con un sensor. Sin embargo, es posible estimar su localización midiendo la inclinación del vehículo, ya que existe una correspondencia directa entre el ángulo de inclinación y el centro de gravedad del vehículo [6]. Considerando dicha correspondencia, el objetivo del sistema de control es mantener la inclinación del vehículo en un valor cercano a cero, con lo que se consigue que el centro de gravedad se mantenga sobre los pies del conductor y que el sistema sea efectivamente estable.

Si el conductor se inclina hacia delante, la plataforma también lo hace. El sistema de control registra el ángulo y la velocidad angular de este movimiento, y tomando

en cuenta estos valores, se compensa la acción del conductor con la acción oportuna de los motores, logrando así estabilidad. Es decir que existe una fuerza que empuja la parte más baja del conductor, por debajo del centro de gravedad del sistema completo, oponiéndose a la inclinación del conductor y reduciendo el ángulo de inclinación.

1.- El movimiento empieza con la inclinación frontal o posterior del conductor, que indica así si quiere avanzar o retroceder, cambiando de esta manera su centro de gravedad.

2.- El vehículo inmediatamente regula el centro de gravedad avanzando o retrocediendo, correspondiendo al movimiento del conductor para de esta forma lograr estabilizarlo.

“Un objeto apoyado sobre una base plana estará en equilibrio estable si la vertical que pasa por el centro de gravedad corta a la base de apoyo. Lo expresamos diciendo que el c.g. se proyecta verticalmente (cae) dentro de la base de apoyo.

Además, si el cuerpo se aleja ligeramente de la posición de equilibrio, aparecerá un momento restaurador y recuperará la posición de equilibrio inicial. No obstante, si se aleja más de la posición de equilibrio, el centro de gravedad puede caer fuera de la base de apoyo y, en estas condiciones, no habrá un momento restaurador y el cuerpo abandona definitivamente la posición de equilibrio inicial mediante una rotación que le llevará a una nueva posición de equilibrio”. Tomado de [5].

1.2.1 VARIABLES EXTERNAS

Es importante identificar las variables que pueden afectar el control, como son aquellas que por su naturaleza son variantes en el tiempo, inoportunas y desequilibrantes [7]. Estas variables, llamadas también perturbaciones, que afectan a la estabilidad del vehículo, se pueden ver en la Tabla 1.1.

Variables	Posible Razón	Importancia
Caminos con salientes o huecos	Los golpes o pendientes bruscas y momentáneas pueden confundir a los sensores y por ende el control.	1
Peso de la Persona	Es necesario definir este límite para no provocar sobrecargas.	2
Inclinación del camino	La plataforma completa gira o se inclina confundiendo a los sensores y además desequilibra al conductor.	3
Fricción por el suelo	Implica mayor esfuerzo para los motores. Puede contrarrestarse con el diseño de las llantas.	4
Lluvia	La estructura debe tener una cubierta para aguantar posibles filtraciones de agua, ya que es un vehículo que puede conducirse en el aire libre.	5
Calor	El funcionamiento de la electrónica puede verse afectado por el calentamiento producto del ambiente externo o el propio trabajo interno.	6
Viento y Polvo	Su combinación puede llegar a las partes electrónicas, uniones mecánicas o sensores, afectándolas.	7
Ruido Electromagnético	Estas interferencias (Ej: motores) genera ruido que afecta a los circuitos electrónicos.	8

Tabla 1.1: Posibles perturbaciones

Una vez que se ha identificado las posibles perturbaciones, es necesario considerarlas en la etapa de diseño del prototipo, para en la medida de lo posible evitar que sea afectado de forma notable por las mismas. A continuación, se analiza algunos conceptos que permiten dar robustez al vehículo frente a las perturbaciones mencionadas.

1.2.2 FILTRO KALMAN

El Filtro Kalman es un método matemático cuyo objetivo es usar las mediciones de una variable, observadas durante el tiempo y que contienen ruido, para

producir valores que tienden al valor verdadero de la medición [8]; es decir, ayuda a contrarrestar el ruido blanco presente en el sistema. Tiene múltiples aplicaciones en sistemas militares y espaciales. Si se quisiera trabajar con sistemas no lineales, se debe usar el Filtro Kalman Extendido [9]. La Figura 1.1 presenta en que parte del sistema de control participa el Filtro Kalman.

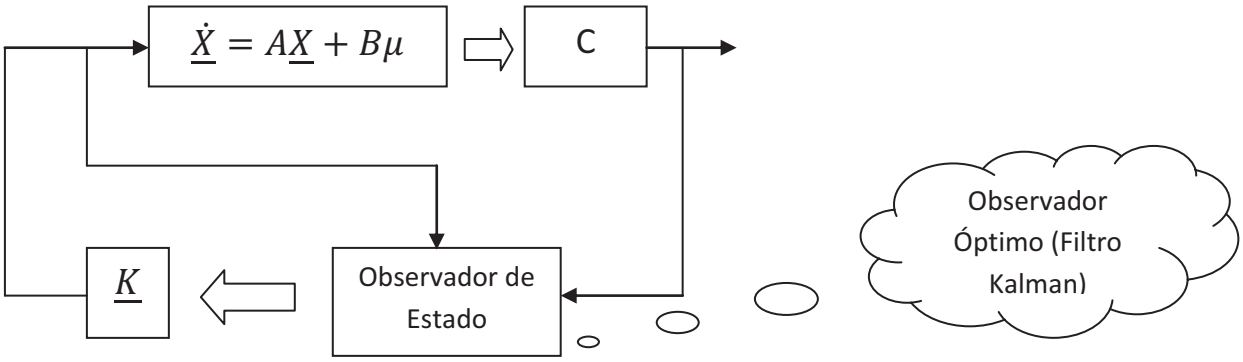


Figura 1.1: Esquema de un sistema de control con FK, tomado de [9].

Por lo visto en la Figura 1.1, cuando se trabaja con Filtro Kalman, se trabaja con un Modelo Estocástico que tiene la siguiente forma.

$$\begin{cases} \underline{X}(k+1) = AX(k) + Bu(K) + W(k) \\ Y(k) = CX(k) + V(k) \end{cases} \text{[9]}$$

Donde:

$$\begin{cases} W(k) \\ V(k) \end{cases}$$

Representan el ruido del proceso y el ruido de la medición respectivamente.

1.2.3 MOTORES

Los motores seleccionados son motores DC, comúnmente empleados en sillas de ruedas y robots de combate. Son comercializados por NPC (National Power Chair). La elección de los mismos se debe a que cuentan con la potencia

necesaria para movilizar a una persona sin inconveniente. Con esto no se ve limitado el vehículo al transporte de personas livianas. El dimensionamiento de los mismos se detalla en el capítulo de diseño y construcción.

1.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE CONTROL

Para poder dar solución a un problema de control, es necesario en primer lugar representar dicho problema de control. De esta manera, es posible analizar las causas del problema y resolverlas.

1.3.1 DESCRIPCIÓN Y MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

El sistema es una plataforma que cuenta con dos puntos de apoyo sobre el piso, que son sus llantas, y que se encuentran propulsadas y controladas independientemente por los motores de DC. Sobre la plataforma se moviliza una persona, que se modela como una masa puntal situada a una cierta distancia "ℓ" del plano de la plataforma base o como una barra rígida [10].

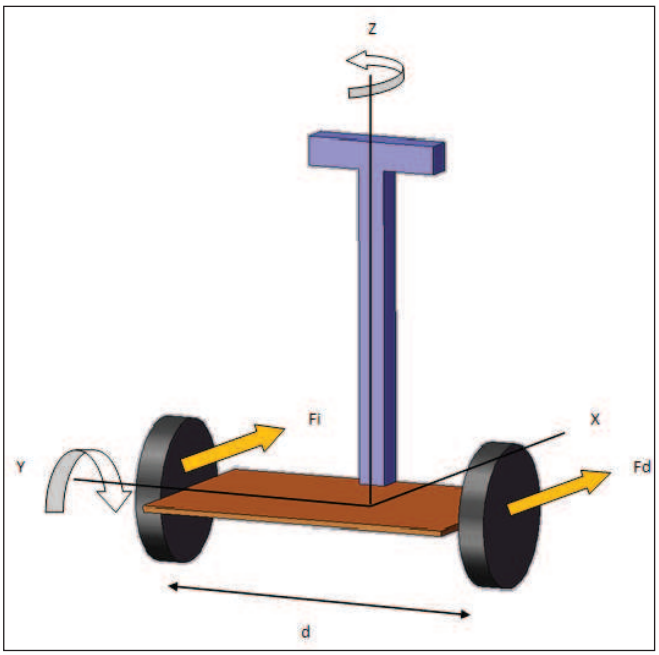


Figura 1.2: Esquema básico del vehículo

En la Figura 1.2 se muestra de forma esquemática los ejes del sistema de coordenadas (X, Y, Z), la distancia “d” entre las ruedas, los grados de libertad del vehículo (Y, Z) y las entradas aplicadas (Fuerzas de los motores: Fi, Fd).

1.3.2 MODELO DEL SISTEMA

Desde el punto de vista de control, es posible descomponer este vehículo en dos subsistemas [10]:

1. Robot móvil con sistema de tracción diferencial para controlar la dirección de giro.
2. Sistema de péndulo invertido sobre el vehículo.

1.3.3 SISTEMA DE TRACCIÓN DIFERENCIAL

En robótica móvil uno de los primeros pasos es definir la plataforma de navegación del robot, es decir, el sistema de propulsión y dirección. Este sistema permite al robot desplazarse dentro de un determinado entorno. Uno de los más usuales se basa en el uso de ruedas con tracción diferencial. Este sistema consta de dos ruedas situadas diametralmente opuestas y sobre un eje perpendicular a la dirección del robot [11]. Cada rueda es controlada por un motor (lo que se conoce como rueda motriz), de forma que se realizan los giros dando diferentes velocidades a cada rueda.

Así por ejemplo si se quiere girar a la izquierda, se da mayor velocidad al motor derecho; y si se quiere girar a la derecha, se da mayor velocidad al motor izquierdo.

En el caso de este vehículo, la configuración puede resumirse como dos ruedas con tracción independiente sin ninguna tercera rueda de apoyo, únicamente con dos puntos de apoyo.

Este sistema tiene como entradas las fuerzas ejercidas por las llantas y como salida la velocidad de giro respecto del eje vertical Z. La ecuación de este modelo es la siguiente [10]:

$$J\ddot{\delta} = (Fd - Fi)d$$

J: Momento de inercia respecto del eje vertical

$\ddot{\delta}$: Aceleración angular alrededor del eje Z.

d: Distancia entre las ruedas.

Fi y Fd: Fuerzas de la rueda izquierda y derecha respectivamente.

1.3.4 RESTRICCIONES NO HOLÓNOMAS [12]

Esta restricción significa que el robot puede moverse de manera instantánea hacia adelante o hacia atrás, pero no puede hacerlo lateralmente por el deslizamiento de las ruedas (Figura 1.3).

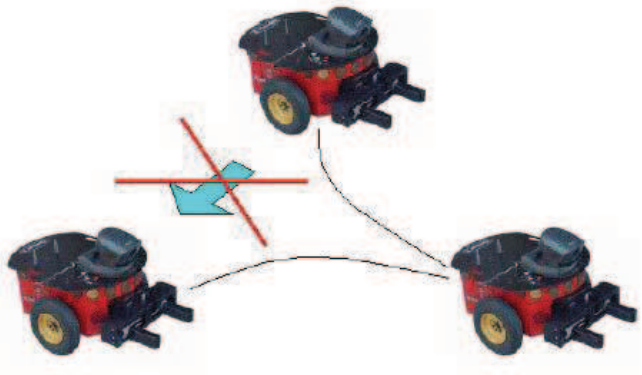


Figura 1.3: Desplazamiento del vehículo

1.3.5 CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN (CIR)

También conocido como centro instantáneo de curvatura (CIC) es el punto de intersección de todos los ejes de las ruedas como puede observarse en la Figura 1.4 a), b), c), d).

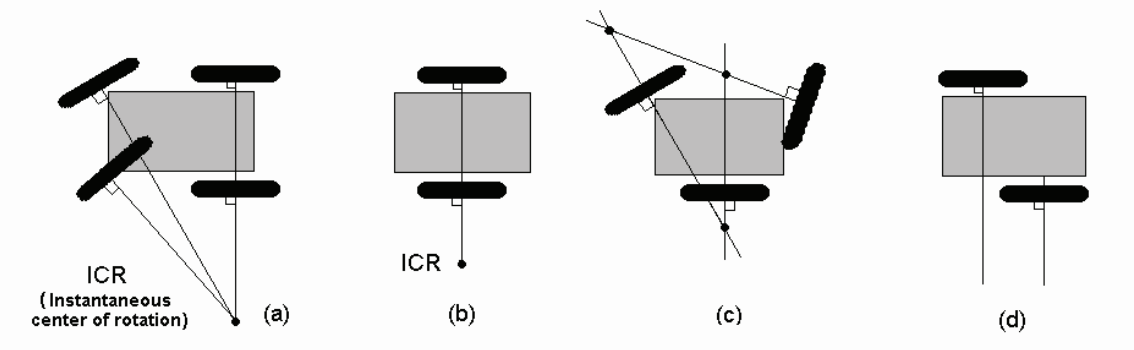


Figura 1.4: Centro instantáneo de curvatura, tomado de [13].

Así se tiene que en la locomoción diferencial la dirección se realiza modificando la velocidad relativa de las ruedas.

El modelo cinemático de esta plataforma está dado por [13]:

$$v = \frac{vL + vR}{2} = \frac{R(\omega L + \omega R)}{2}$$
$$\omega = \frac{vR - vL}{L} = \frac{R(\omega L - \omega R)}{L}$$

En la Figura 1.5, se puede observar lo que representa cada una de las variables del modelo cinemático presentado.

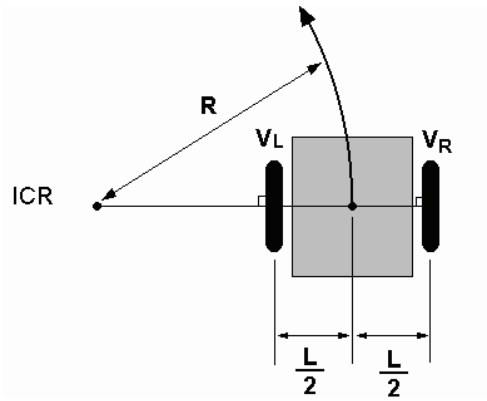


Figura 1.5: Giro por velocidad relativa de ruedas, tomado de [13]

L: Distancia existente entre las ruedas.

R: Distancia existente entre el CIR y el punto medio entre las dos ruedas.

VL: Velocidad lineal de la rueda izquierda.

VR: Velocidad lineal de la rueda derecha.

ωL: Velocidad angular de la rueda izquierda.

ωR: Velocidad angular de la rueda derecha.

1.3.6 SISTEMA DE PENDULO INVERTIDO SOBRE MÓVIL

El clásico problema del péndulo invertido sobre una base móvil representa de manera muy próxima la dinámica del vehículo que se presenta (Figura 1.6).

El péndulo invertido consiste en un problema dinámico en donde una barra vertical se coloca sobre el centro de una base móvil que puede moverse hacia delante y hacia atrás. De esta manera, las perturbaciones que precipiten a la barra son compensadas con el movimiento de la base para así restablecer su centro de gravedad y llevarla a una posición de equilibrio [14].

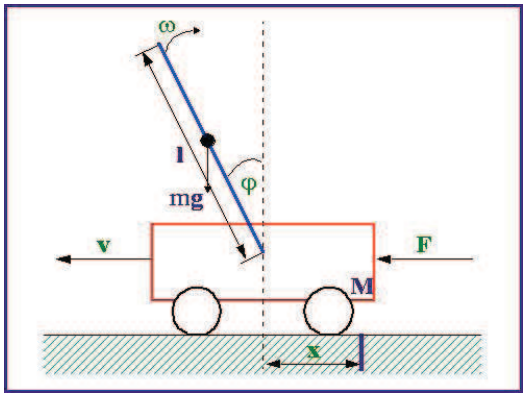


Figura 1.6: Péndulo invertido sobre base móvil, tomado de [14].

Muchas técnicas de control son puestas a prueba con el péndulo invertido como por ejemplo: Reguladores de PID, Controles Óptimos, redes neuronales, algoritmos genéticos, entre otros. Las variaciones en este problema incluyen

acoplamientos múltiples, permitiendo que el movimiento del carro sea ordenado mientras que mantienen el péndulo, y balancean el sistema.

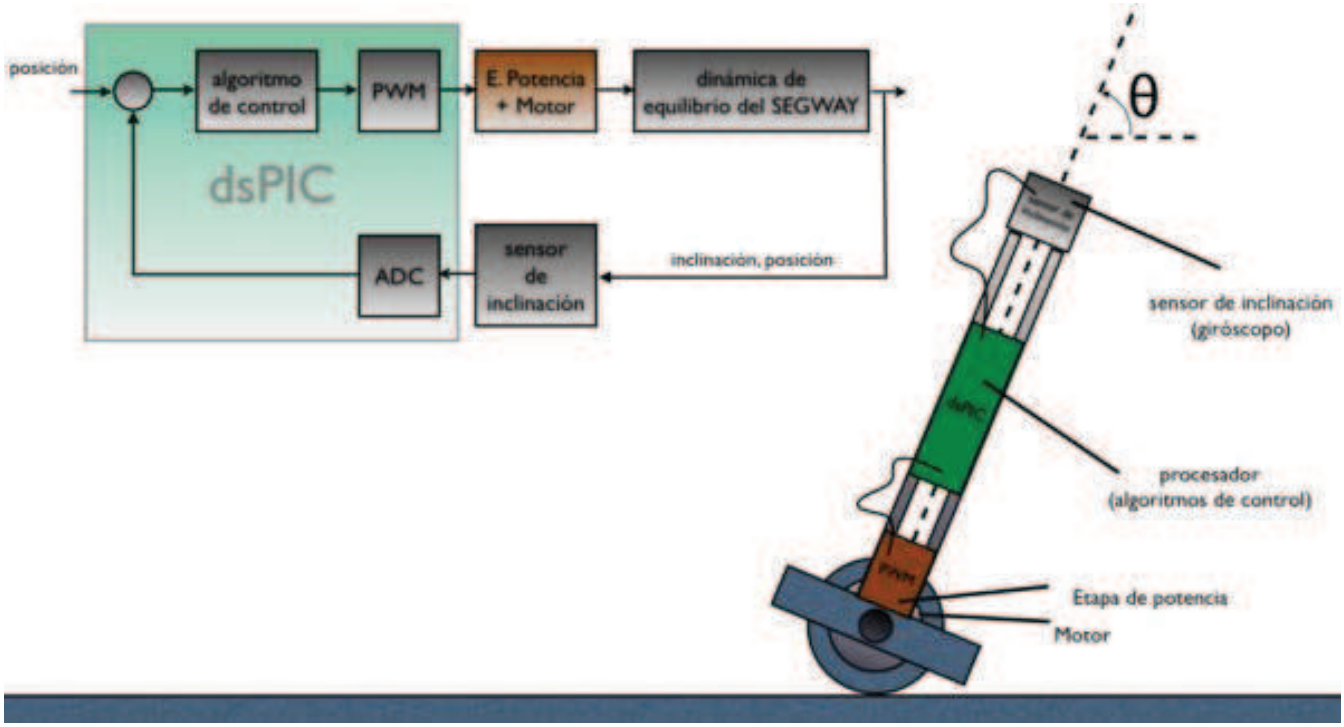


Figura 1.7: Ejemplo de un péndulo invertido, tomado de [15].

En la Figura 1.7 y Figura 1.8 puede observarse los elementos del sistema de péndulo invertido sobre un móvil.

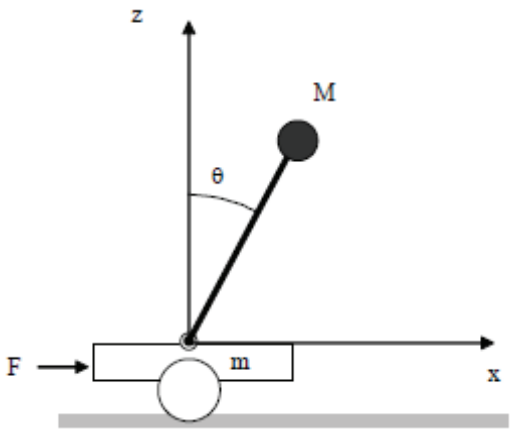


Figura 1.8: Elementos para modelación del sistema, tomado de [10].

Para modelar el sistema del péndulo invertido se empleará el método variacional nodal [16], ya que permite realizar la modelación en base a energías, que son cantidades escalares y facilitan la modelación, y porque permite modelar sistemas no lineales. Los pasos a seguir son los siguientes:

1) Determinación de coordenadas generalizadas: Coordenada generalizada son aquellos puntos que constituyen acumulación de esfuerzo (en el caso mecánico, esfuerzo es la velocidad). En el caso de los sistemas mecánicos existen dos tipos de coordenadas generalizadas: posición lineal (x) que es la acumulación de la velocidad lineal (Sistema de traslación) y la posición angular (θ) que es la acumulación de velocidad angular (Sistema de rotación). En este caso las coordenadas generalizadas son: "θ" y "x".

2) Determinación de coordenadas variacionales: Coordenada variacional son aquellas coordenadas generalizadas que pueden variar su valor. En este caso las coordenadas variacionales son también: "θ" y "x".

3) Cálculo del Lagrangiano L:

$$L = U^* - T$$

Donde:
U^*: Es la co-energía en almacenadores de flujo
T: Es la energía en almacenadores de esfuerzo

Debido a que en este sistema mecánico no existen resortes, el valor de T es cero.

$$T = 0$$

"U^*" en los sistemas mecánicos es la energía cinética almacenada por las masas.

$$U^* = \frac{1}{2}mv^2$$

$$U^* = \frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$v_1 = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$$

$$v_2 = \left|\dot{x} + l\dot{\theta}\right|$$

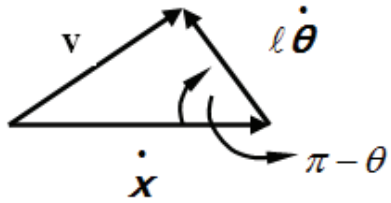


Figura 1.9: Relación entre ángulos de las velocidades

$$U^* = \frac{1}{2}m(\dot{x})^2 + \frac{1}{2}M\left((\dot{x})^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}cos\theta + \left(l\dot{\theta}\right)^2\right)$$

$$L = U^* - T = \frac{1}{2}m(\dot{x})^2 + \frac{1}{2}M\left((\dot{x})^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}cos\theta + \left(l\dot{\theta}\right)^2\right)$$

$$L = \frac{1}{2}(M+m)(\dot{x})^2 + \frac{1}{2}M\left(2\dot{x}l\dot{\theta}cos\theta + \left(l\dot{\theta}\right)^2\right)$$

4) Cálculo del co-contenido J: En los sistemas mecánicos el co-contenido J representa los amortiguadores. En este sistema no existen amortiguadores, por tanto J es igual a cero.

$$J = 0$$

5) Para cada coordenada variacional se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_a}\right) - \frac{\partial L}{\partial e_a} + \left(\frac{\partial J}{\partial \dot{e}_a}\right) = F$$

Donde:

e_a: Es la acumulación de esfuerzo y representa a las coordenadas generalizadas.

L: Es el Lagrangiano

J: Es el co-contenido.

F: Representa las fuentes de flujo. En el caso de sistemas mecánicos son las fuerzas externas aplicadas.

B_C: Fricción viscosa de la parte móvil

B_P: Fricción viscosa del péndulo

Así al aplicar la fórmula (indicada en el paso 5) a cada coordenada variacional del sistema, objeto de análisis, se obtiene los siguientes resultados:

Para la coordenada generalizada “x”:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} + \left(\frac{\partial J}{\partial \dot{x}}\right) = F_1$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial U^*}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial}{\partial \dot{x}}\left(\frac{1}{2}(M+m)(\dot{x})^2 + \frac{1}{2}M\left(2l\dot{x}\dot{\theta}cos\theta + \left(l\dot{\theta}\right)^2\right)\right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = (M+m)\dot{x} + Ml\dot{\theta}cos\theta$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) = (M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta}cos\theta - Ml\left(\dot{\theta}\right)^2 sen\theta$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{x}} = 0$$

$$F_1 = F - B_C\dot{x}$$

Ecuación 1: $(M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta}cos\theta - Ml\left(\dot{\theta}\right)^2 sen\theta = F - B_C\dot{x}$

Para la coordenada generalizada “θ”:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial J}{\partial \dot{\theta}}\right) = F_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}}\left(\frac{1}{2}(M+m)(\dot{x})^2 + \frac{1}{2}M\left(2l\dot{x}\dot{\theta}cos\theta + \left(l\dot{\theta}\right)^2\right)\right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = Ml^2\dot{\theta} + M\dot{x}lcos\theta$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) = Ml^2\ddot{\theta} + M\ddot{x}lcos\theta - M\dot{x}\dot{\theta}lsen\theta$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -M\dot{x}\left(\dot{\theta}\right)^2 lsen\theta$$

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{\theta}} = 0$$

$$F_2 = Mlgsen\theta - B_P\dot{\theta}$$

Ecuación 2: $Ml^2\ddot{\theta} + M\ddot{x}lcos\theta - M\dot{x}\dot{\theta}lsen\theta + M\dot{x}\left(\dot{\theta}\right)^2 lsen\theta = Mlgsen\theta - B_P\dot{\theta}$

En resumen, las ecuaciones del modelo son:

Ecuación 1: $(M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta}cos\theta - Ml\left(\dot{\theta}\right)^2 sen\theta = F - B_C\dot{x}$

Ecuación 2: $Ml^2\ddot{\theta} + M\ddot{x}lcos\theta - M\dot{x}\dot{\theta}lsen\theta + M\dot{x}\left(\dot{\theta}\right)^2 lsen\theta = Mlgsen\theta - B_P\dot{\theta}$

Las ecuaciones 1 y 2 representan matemáticamente el modelo del péndulo invertido sobre una base móvil. De manera práctica interesa únicamente analizar el sistema para pequeñas variaciones de ángulo, es decir en posiciones cercanas al punto de equilibrio y se puede despreciar el rozamiento con el aire, pero no el rozamiento con el piso. De modo que se pueden realizar las siguientes simplificaciones:

En primer lugar se considera: $\dot{\theta} = 0$, ya que se considera el sistema en equilibrio.

Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

Ecuación 1: $(M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta}cos\theta = F - B_C\dot{x}$

Ecuación 2: $Ml^2\ddot{\theta} + M\ddot{x}lcos\theta - Mlgsen\theta = 0$

Cuando las variaciones de θ son pequeñas se puede realizar también las siguientes simplificaciones:

$$cos\theta \approx 1$$

$$sen\theta \approx \theta$$

Con esto las ecuaciones pueden escribirse de la siguiente manera:

Ecuación 1: $(M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta} = F - B_C\dot{x}$

Ecuación 2: $Ml\ddot{\theta} + M\ddot{x} - Mg\theta = 0$

Que son las ecuaciones que rigen el comportamiento del modelo. A partir de estas ecuaciones es posible representar el modelo como variables de estado. Para ello se emplea las ecuaciones que han sido linealizadas, es decir:

Ecuación 1: $(M+m)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta} = F - B_C\dot{x}$

Ecuación 2: $l\ddot{\theta} + \ddot{x} - g\theta = 0$

Operando de manera conveniente se obtiene:

$$\ddot{x} = g\theta - l\ddot{\theta}$$

$$(M+m)\left(g\theta - l\ddot{\theta}\right) + Ml\ddot{\theta} = F - B_C\dot{x}$$

$$Ml\ddot{\theta} = F - B_C\dot{x} - Mg\theta + Ml\ddot{\theta} - mg\theta + ml\ddot{\theta}$$

Lo que conduce al siguiente sistema de ecuaciones

$$\ddot{\theta} = \frac{(M+m)}{ml}g\theta + \frac{B_C\dot{x}}{ml} - \frac{F}{ml}$$

$$\ddot{x} = -\frac{M}{m}g\theta + \frac{F}{m} - \frac{B_C\dot{x}}{m}$$

En forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{(M+m)g}{ml} & 0 & \frac{B_C}{ml} \\ -\frac{Mg}{m} & 0 & -\frac{B_C}{m} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{ml} \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} * F$$

$$\begin{bmatrix} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

Las salidas son el ángulo que forma el péndulo, que debe mantenerse en cero, la velocidad angular del péndulo y la otra salida es la velocidad a la que se desplaza el móvil. Estas son las variables de interés en el control.

En el modelo real se tienen los siguientes datos:

m: Masa del vehículo: 50kg
M: Masa de la persona (péndulo): 70kg
g: Aceleración de la gravedad: 9.8m/s^2
l: Altura del centro de masa con persona: 65cm aproximadamente (Determinado mediante simulación en Solidworks).

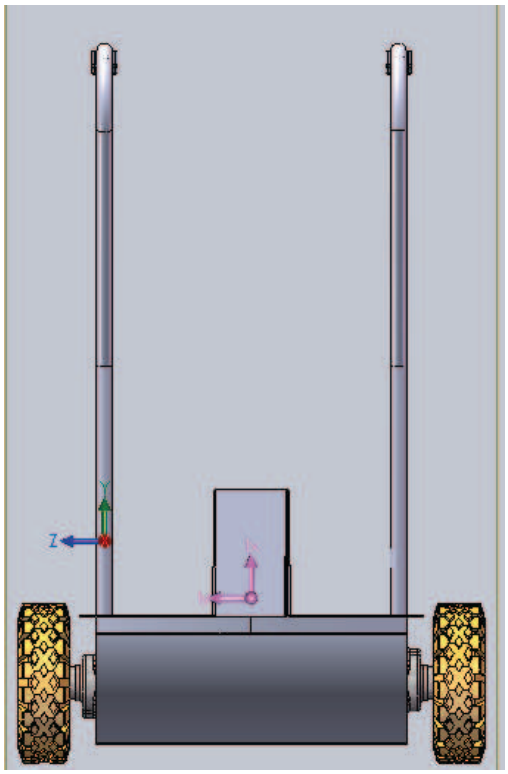


Figura 1.10: Esquema del vehículo realizado en Solidworks

Como puede verse en la Figura 1.10, el punto rosado indica el centro de masa del vehículo sin persona; con una persona éste ubica a una distancia de 65cm de la base aproximadamente.

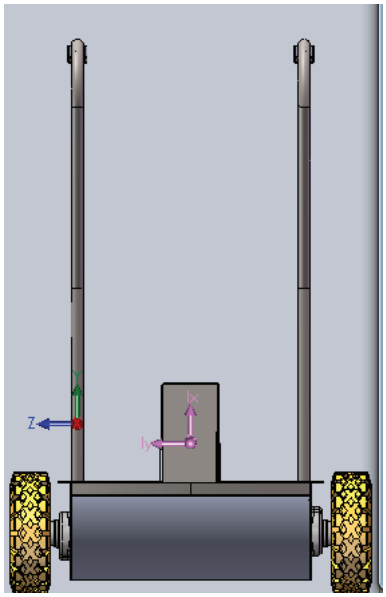
En control es preciso conocer la función de transferencia o el sistema representado en variables de estado, para poder diseñar el controlador adecuado para la aplicación. Con la ventaja de que se puede calibrar de forma técnica al controlador y no simplemente por prueba y error.

Debido a que en la práctica se tiende a la integración de muchos criterios y flexibilidad para mejoras en el diseño de los productos. En la actualidad existen poderosas herramientas, para el diseño mecánico y para la simulación de los sistemas de control, como por ejemplo: Solidworks es un software especializado en el diseño 3D de sistemas mecánicos (CAD Diseño automatizado por Computador), además cuenta con herramientas poderosas para validar el diseño simulando condiciones del mundo real, lo que permite minimizar tiempos y costos en el desarrollo de prototipos. Por otra parte, Matlab es una poderosa herramienta matemática que se empleará para diseñar el controlador del vehículo.

La razón para emplear estas dos herramientas matemáticas es que es posible integrar el modelo construido en Solidworks con el módulo SimMechanics de Matlab. Esto permite representar en Matlab el modelo construido en Solidworks mediante bloques en Simulink, sobre los cuales es posible tomar acciones de control y medir variables de salida. Los bloques importados contienen las características principales de los elementos, que fueron dadas y calculadas en Solidworks, como el peso, momentos de inercia, entre otros. Si en cierto punto de la construcción del controlador en Matlab se observa que es preciso mejorar el diseño mecánico por algún motivo, es posible hacerlo en Solidworks y actualizar el modelo en Matlab.

Como es lógico, no se requiere representar en Matlab toda la complejidad del modelo construido en Solidworks, sino que se pretende únicamente representar las características más importantes del modelo. Para la estabilización del vehículo se requiere únicamente conocer los pesos, momentos de inercia y movimientos relativos de las piezas entre sí. Por ello del modelo completo que se obtiene, se utiliza simplemente aquello que es de interés. En este caso se pretende controlar simplemente la estabilidad del móvil y se trabaja con el modelo reducido.

El modelo construido en Solidworks es el que se muestra en las Figuras 1.11 y 1.12, con sus correspondientes propiedades físicas:



Masa = 51.26 kilogramos

Volumen = 0.02 metros^3

Área de superficie = 4.43 metros^2

Centro de masa: (metros)
X = 0.31
Y = -0.04
Z = -0.23

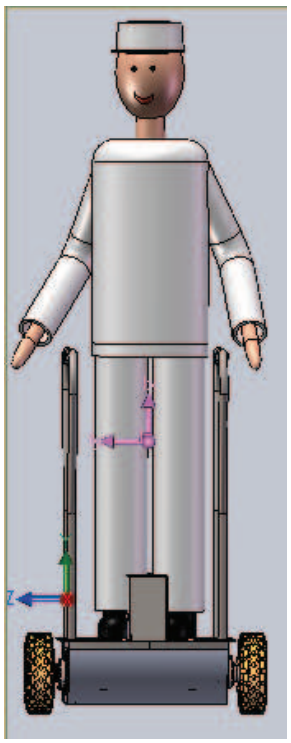
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros^2)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (-0.06, 1.00, 0.00) Px = 2.76
Iy = (-0.00, -0.00, 1.00) Py = 4.73
Iz = (1.00, 0.06, 0.00) Pz = 5.88

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
(Medido desde el centro de masa y alineado con el sistema de coordenadas resultante)

Lxx = 5.87	Lxy = -0.18	Lxz = -0.01
Lyx = -0.18	Lyy = 2.77	Lyz = 0.01
Lzx = -0.01	Lzy = 0.01	Lzz = 4.73

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

Figura 1.11: Modelo construido en Solidworks sin persona



Propiedades físicas de segway (Assembly Configuration - Predeterminado)

Sistema de coordenadas de salida: -- predeterminado --

Masa = 124.99 kilogramos

Volumen = 0.12 metros^3

Área de superficie = 6.94 metros^2

Centro de masa: (metros)
X = 0.24
Y = 0.50
Z = -0.24

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros^2)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (-0.08, 1.00, -0.01) Px = 4.15
Iy = (-0.09, 0.00, 1.00) Py = 47.88
Iz = (0.99, 0.08, 0.09) Pz = 49.58

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
(Medido desde el centro de masa y alineado con el sistema de coordenadas resultante)

Lxx = 49.28	Lxy = -3.61	Lxz = -0.11
Lyx = -3.61	Lyy = 4.44	Lyz = -0.53
Lzx = -0.11	Lzy = -0.53	Lzz = 47.89

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

Figura 1.12: Modelo construido en Solidworks con persona

El enlace entre Solidworks y Matlab se lo realiza con el módulo Links SimMechanics, que sencillamente convierte el modelo mecánico 3D de Solidworks en un archivo *.xml, el cual será importado en Matlab y con el cual se ha construido el modelo visto en la Figura 1.13.

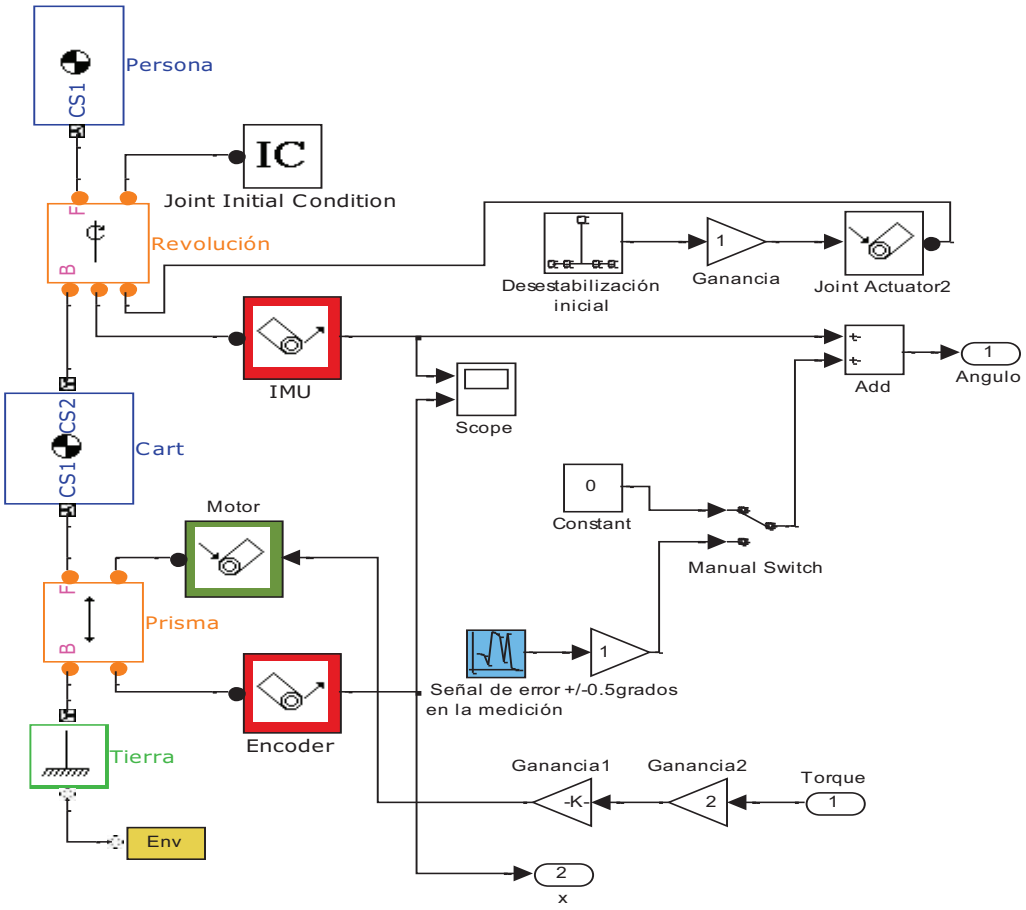


Figura 1.13: Modelo del vehículo en MATLAB

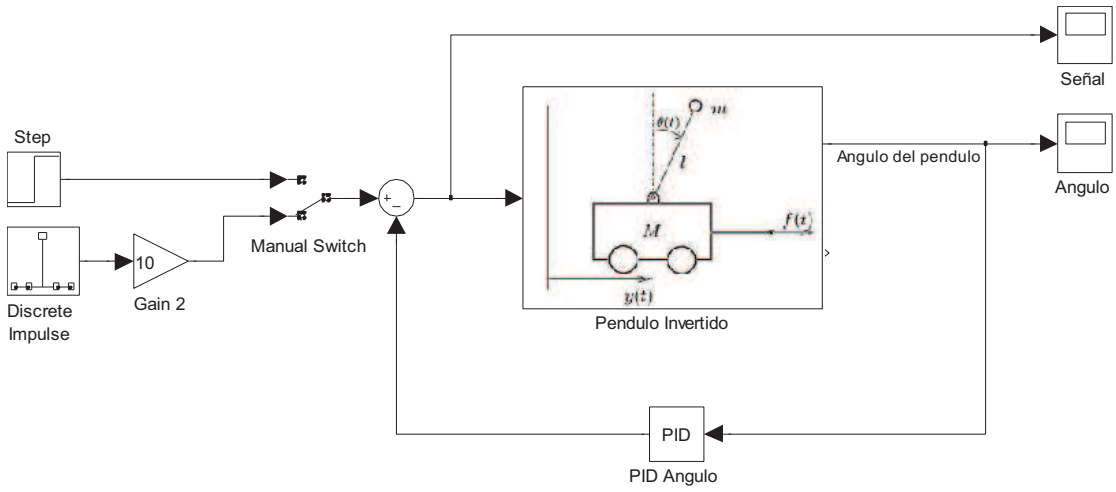
Éste es el modelo simplificado de diagrama de bloques en Simulink del vehículo para control de estabilización. Este primer modelo tiene como propósito determinar cuál debería ser el máximo error en la medición del ángulo de inclinación del vehículo que puede tener el sensor de inclinación, sin que ello implique que el vehículo se desestabilice.

Los bloques de borde azul (Cart y Persona) representan la plataforma del vehículo y a la persona respectivamente, y contienen el peso, momento de inercia y dimensiones de cada componente.

Los bloques de borde anaranjado representan las articulaciones; la articulación prisma representa el movimiento hacia adelante o hacia atrás que puede proporcionar el móvil; la articulación revolución representa la dirección o inclinación hacia adelante o hacia atrás de la persona para conseguir que el vehículo se desplace hacia adelante o hacia atrás y cuyo punto de consigna es mantener siempre el ángulo lo más próximo a cero posible. El bloque (Joint Initial Condition) permite establecer un ángulo inicial de inclinación de la persona que permitirá posteriormente analizar el rango límite en el que puede arrancar el vehículo y conservar la estabilidad.

Los bloques de rojo son los sensores de las variables de estado. En este caso únicamente se ha medido el ángulo y la posición en el plano “x”, para ello se emplea una Unidad de Medición Inercial (IMU) y un encoder.

El bloque de color verde oscuro representa la entrada al actuador, es decir, el valor del Torque que debe proporcionar el motor para compensar la inclinación del vehículo.



Figrua 1.14: Diagrama de bloques del controlador SISO para control de ángulo de inlcinación

Los demás diagramas de bloques sirven para realizar operaciones como: un impulso inicial de perturbación, y la suma de un error a la medición del ángulo con

el propósito de determinar el máximo error posible en la medición para conservar la estabilidad.

Una vez hecho esto se construye un diagrama de bloques mucho más sencillo que permite hacer la realimentación, y por tanto el control en lazo cerrado (Figura 1.14).

De forma mucho más intuitiva es posible ver en este diagrama de bloques que existen dos posibles entradas: una de ellas es una entrada impulso y la otra una entrada paso. Existen los bloques Señal y Ángulo, que representan osciloscopios que permiten conocer el valor del ángulo y del torque necesario que debe aplicar el motor para conseguir mantener el ángulo deseado. Esto permite determinar si el motor es capaz de proporcionar dicho torque. El PID simplemente es el controlador que permite conseguir la estabilidad. El bloque grande representa el modelo del vehículo en variables de estado.

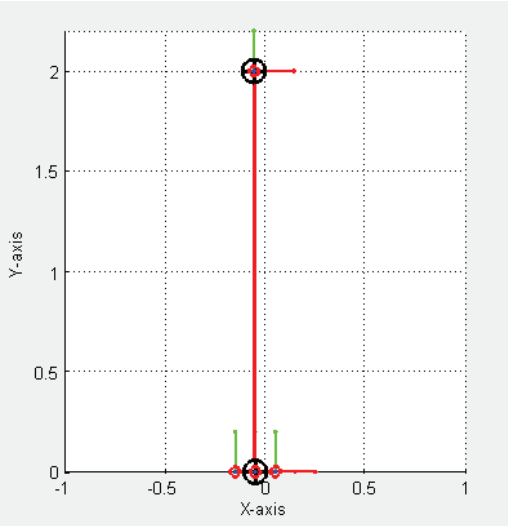


Figura 1.15: Simulación de estabilidad en Matlab

Como resultado de la simulación se tiene el péndulo estabilizado. Se puede concluir que un error de +/-1 grados no permite estabilizar el sistema. Por lo que la precisión del sensor debe ser mucho mejor que un grado de error.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

2.1 SISTEMA MECÁNICO

Un sistema mecánico es un sistema compuesto por un conjunto de cuerpos sólidos rígidos, cuyos movimientos se encuentran relacionados entre sí [17].

2.1.1 BATERÍAS [18]

Una batería es un dispositivo que acumula energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos. Luego es capaz de devolver esta energía. Este ciclo puede repetirse un número de veces limitado.

El sistema de alimentación del vehículo se compone de dos baterías de 12V conectadas en serie con el objeto de obtener 24Vdc. Estas baterías alimentan tanto a la parte de potencia como a la parte electrónica, sin embargo esta última no se alimenta directamente con los 24Vdc, sino solo con una batería de 12V. Se ha seleccionado el modelo NPC-B1412 de NPC Robotics (Figura 2.1). Sus características básicas se muestran en la Tabla 2.1:

Figura 2.2: Batería seleccionada NPC-B1412

Característica	Valor	Unidad
Tipo	Batería de Plomo-Ácido	
Voltaje	12	V
Capacidad	14	Ah
Tasa de descarga	90-3	minutos
Corriente máxima de entrega	300	A
Peso	11.9	Lb
Dimensiones	6”x5.8”x3.5	Ft

Tabla 2.1: Características de Batería, tomado de [19].

Algunas de las características más importantes de las baterías son:

- **Voltaje nominal:** Es el voltaje que es capaz de entregar la batería a la carga (12V).

- **Tipo:** Existen baterías selladas y abiertas. Las baterías selladas son por ejemplo las de ión litio, las de gel, entre otras. Se caracterizan por su eficiencia, duración, confiabilidad y peso. La desventaja que presenta para esta aplicación es que tienen baja capacidad de corriente. Por otro lado las baterías abiertas son por ejemplo las de plomo-ácido que tienen una gran capacidad de corriente. Su desventaja es que son contaminantes y que despiden gases de hidrógeno cuando se calientan. Para esta aplicación, como los motores usan corriente alta se emplean baterías de ácido-plomo, principalmente por sus características de corriente.

- **Capacidad:** Hace referencia a la carga total almacenada por la batería, y se mide en Amperios-hora. La batería para esta aplicación es de 14Ah.

- **Corriente máxima:** Es el máximo valor de corriente que es capaz de entregar la batería por un período muy corto (Generalmente menos de 30 segundos). La batería seleccionada para esta aplicación es capaz de entregar 300A pico.

- **Voltaje de descarga profunda:** Algunas baterías no pueden descargarse por completo, existe un límite inferior mínimo de voltaje hasta el cual pueden descargarse sin dañarse. Una vez que el voltaje de la batería baja de este límite termina su vida útil. Este límite se conoce como el voltaje de descarga profunda. Generalmente está en el orden de los 7.5 – 8V. Por ejemplo si se cuenta con una batería de 60Ah, que está entregando una corriente constante de 6A, se esperaría que lo haga durante 10 horas. En la realidad esto no sucede así, sino que tras sobrepasar el voltaje de descarga profunda, la batería deja de ser útil.

- **Corriente máxima para recarga de la batería:** Es el máximo valor de la corriente que se debe emplear para recargar la batería. Por lo general, este valor está entre el 10% y el 20% del valor numérico de la capacidad de la batería. Así por ejemplo para una batería de 60Ah, la corriente de recarga podría estar entre 6 y 12A. Si el fabricante indica un valor menor, deberá respetarse estos límites para cuidar la vida útil de la batería.

- **Corriente de flotación o corriente de mantenimiento:** Es la corriente que el cargador debe entregar a la batería, para mantenerla cargada, cuando la batería no se encuentra alimentando a la carga. Esta corriente repone la corriente que pierde la batería por su resistencia interna de pérdidas. Esta corriente está en el orden de los miliamperios.

- **Voltaje de flotación:** Es el voltaje hasta el cual el cargador carga a la batería. Generalmente es un 10% más del voltaje nominal. Así por ejemplo para una batería de 12V, el voltaje de flotación es de 13,2V.

- **Vida útil o expectativa de vida:** En baterías recargables, como la de esta aplicación, el fabricante proporciona una tabla en la que especifica las características de vida útil (Figura 2.2).

Life expectancy :	
Cycle Use :	100% depth of discharge 250 cycles 80% depth of discharge 350 cycles 50% depth of discharge 550 cycles
Standby Use :	3~5 years

Figura 2.2: Características de descarga de batería, tomado de [20].

- **Voltaje de ecualización:** Eventualmente es conveniente cargar a la batería un poco más allá del voltaje de flotación. Esto se lo realiza eventualmente pero con periodicidad, el objetivo es reactivar el proceso electroquímico interno de la batería. Este voltaje es por lo general un 20% más del voltaje nominal. Así para una batería de 12V, el voltaje de ecualización es 14,4V. El fabricante es quien recomienda la periodicidad, y el tiempo que se debe cargar a la batería.

- **Estimación de la duración de las baterías:** Las condiciones iniciales que se suponen para esta estimación, son que la batería está cargada a su máxima capacidad (Ah), se la ha cargado hasta el voltaje de flotación y la corriente que entrega es constante.

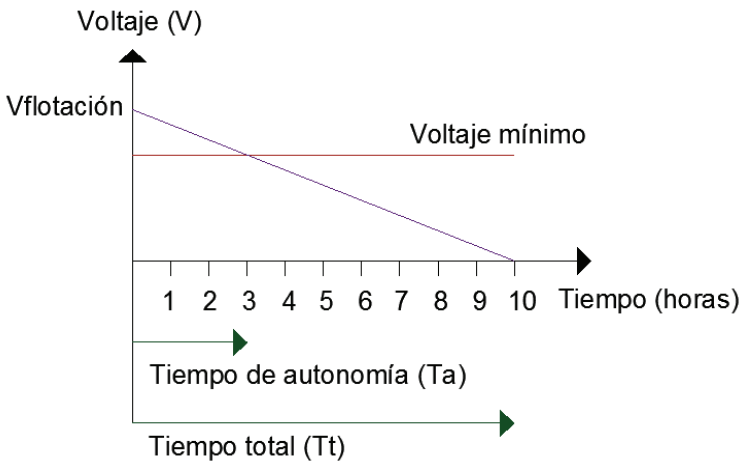


Figura 2.3: Comportamiento de la Batería

Por ejemplo (Figura 2.3), si se tiene una batería de 60Ah, que entrega una corriente constante de 6A, se tiene:

$$Tt = \frac{Carga\ total}{Corriente} = \frac{60Ah}{6A} = 10h$$

El voltaje mínimo es el valor máximo entre el voltaje de descarga profunda y el voltaje mínimo que puede soportar la carga. Entonces se realiza una simetría de triángulos. Así:

$$\frac{Tiempo\ total}{Tiempo\ de\ autonomía} = \frac{Vflotación}{Vflotación - Voltaje\ mínimo}$$

Despejando el tiempo de autonomía se tiene:

$$Tiempo\ de\ autonomía = Tt * \frac{Vflotación - Voltaje\ mínimo}{Vflotación}$$

$$Tiempo\ de\ autonomía = \frac{Carga\ total}{Corriente} * \frac{Vflotación - Voltaje\ mínimo}{Vflotación}$$

Para esta aplicación se tendría

$$Tiempo\ de\ autonomía = \frac{14Ah}{10A} * \frac{13{,}2 - 8}{13{,}2} \approx 30minutos$$

En esta aplicación la corriente de la carga no es constante, sino que puede variar por diversos factores como el peso de la persona, la aceleración que se desee dar al vehículo o el tipo e inclinación del terreno, por el que se circule; por ello para estimar el tiempo de autonomía, se ha considerado una corriente promedio de 10 amperios, determinada en función de mediciones.

2.1.2 ADAPTADOR EJE-RUEDA

Esta pieza se emplea para acoplar mecánicamente el eje del motor con la llanta. Ambas piezas se acoplan mediante tornillos.

a) b) c)

Figura 2.4: Adaptador llanta **a)** real; **b)** características **c)** Solidworks

Los tornillos interiores permiten ajustar el adaptador con el motor, mientras que los exteriores permiten ajustar el adaptador a la llanta. Este adaptador es el que ofrece NPC Robotics como adaptador para los motores T64 y T74. El material del cual está fabricado es aluminio y su peso es 5 onzas (Figura 2.4).

2.1.3 LLANTAS

Se seleccionó las llantas comercializadas por NPC Robotics porque el acople mecánico con el motor es muy sencillo. Esta empresa comercializa llantas de 10, 12 y 14 pulgadas. De entre estas opciones, se escogió las de 14 pulgadas, porque son las que dan mayor velocidad lineal al vehículo. Las ruedas empleadas son neumáticas, con cámara de aire y llanta de acero. El modelo de la llanta es NPC-PT5306 [21]. El material del soporte de la llanta, que se conecta con el adaptador es de acero. El peso de cada llanta es de 9 libras (Figura 2.5).

a) b)

Figura 2.5: Llanta **a)** real; **b)** Solidworks

Las ruedas de plástico presentan un cierto deslizamiento en superficies duras y muy lisas, por lo cual no son apropiadas para esta aplicación.

2.1.4 MOTORES

Para la selección y dimensionamiento de los motores, es preciso tomar en cuenta varios factores, principalmente la potencia y relaciones torque-velocidad requeridas para la aplicación.

En primer lugar, como requerimiento de velocidad el vehículo deberá poder movilizarse más rápido que una persona caminando; es decir, la velocidad a la que deberá poder desplazarse el vehículo deberá ser mayor a 4km/h. Se ha escogido que como máximo la velocidad del vehículo sea 10km/h. Esta aplicación requiere el uso de caja reductora, debido a que no se requieren altas velocidades, sino alto torque.

La velocidad lineal del vehículo se relaciona con la velocidad angular del motor, a la salida de la caja reductora, es decir, en el eje de la rueda, en función del radio de la llanta.

$$\vartheta elocidad\ Lineal = \vartheta elocidad\ Angular\ Salida * Radio\ Llanta$$

$$\vartheta = \omega * R$$

Despejando, es posible calcular la velocidad angular requerida al eje de la llanta.

$$\omega = \frac{\vartheta}{R} = 10\frac{km}{h} * \frac{1}{7pulg} * \frac{1pulg}{2.54cm} * \frac{100000cm}{1km} * \frac{1h}{60min} * \frac{1rev}{2\pi rad} \approx 150rpm$$

Por tanto, para cumplir con el requisito propuesto, la velocidad angular a la salida de la caja reductora debe ser superior a 150 RPM.

A continuación, es necesario analizar las fuerzas que intervienen en el movimiento y el torque que deberá ser capaz de proporcionar el motor. Para esto se realizará un análisis sencillo de fuerzas, debido a que el modelo matemático

desarrollado en el Capítulo 1 es válido solo para superficies planas. Para el dimensionamiento se analiza la peor condición que deberá soportar el conjunto motor-caja reductora, en la que se tendría:

- Peso de la persona (Pp): 70Kgf (Seleccionado como el peso promedio de una persona)
- Peso del vehículo (Pv): 50Kgf. Este peso ha sido determinado, considerando los componentes más representativos en peso. Entre ellos se encuentran:

  Peso de los conjuntos motor-caja reductora: 25lbf.
  Peso de las dos baterías: 25lbf.
  Peso de las dos llantas: 20lbf.
  Peso de la estructura: 20lbf. (Como materiales se emplea hierro negro y aluminio).
  Peso de componentes electrónicos, protecciones: 10lbf.

  En total suma 100lbf. Como margen de seguridad se considerará 10lbf. Esta es la justificación y detalle del peso estimado del vehículo (50Kgf.)

- Velocidad Inicial: 0km/h
- Inclinación del terreno: 10°
- Fuerza de rozamiento (Fr)
- Fuerza aplicada por el conjunto motor-caja reductora (Fm)

Las fuerzas que intervienen en el movimiento se presentan en la Figura 2.6.

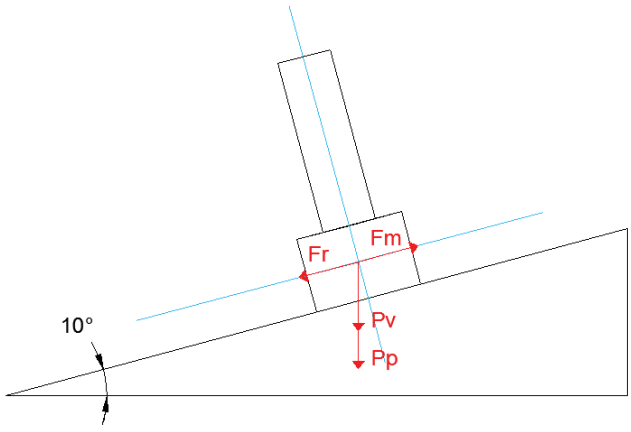


Figura 2.6: Diagrama de fuerzas presentes en el movimiento.

Se considerará que cada conjunto motor-caja reductora ejerce la fuerza Fm. Por tanto, aplicando las leyes de Newton se tendría:

$$2 * Fm = Fr + (Pp + Pv) * sen(10°) + ma$$

Se considerará una aceleración muy pequeña, de modo que tienda a cero, debido a que únicamente se pretende calcular la fuerza que permita romper el estado de reposo e iniciar el movimiento.

$$a \to 0$$
$$Fr = \mu N$$
$$\mu = 0.3 \text{ [22]}$$
$$N = Pp * \cos(10°) + Pv * \cos(10°)$$
$$2 * Fm = 0.3 * \big((Pp + Pv) * \cos(10°)\big) + (Pp + Pv) * sen(10°)$$
$$Fm = 275.82N$$

Ahora es necesario calcular el torque requerido para ejercer esta fuerza.

$$T = Fm * Rllanta$$
$$T = 275.82 * 0.1778 = 49Nm = 430lbf * in$$

Como consecuencia el conjunto motor-caja reductora deberá ser capaz de entregar un torque de 49 Nm en las peores condiciones.

Para el cálculo de la potencia del motor será necesario realizar el análisis en condiciones de funcionamiento sobre una superficie plana. Se asumirá que el vehículo parte del reposo y que desea llegar a su velocidad máxima, que es 10km/h, aplicando un torque constante de 40Nm (menor al máximo calculado en la peor condición). De modo que la condición pico de potencia es:

$$Potencia\ pico = T\omega = 40Nm * 10\frac{km}{h} * \frac{1000m}{1km} * \frac{1h}{3600s} * \frac{1}{0.1778m} = 625W$$

Por cuestiones de seguridad (en caso de que el prototipo resultase más pesado de lo planificado, o se superase una condición límite en la que el vehículo necesitase mayor potencia para conservar la estabilidad, entre otros) y debido a que la eficiencia de un motor no es el 100%, es necesario ajustar el valor de potencia calculado.

$$Potencia\ motor = \frac{Potencia\ pico}{0.7} = 892W$$

De modo que el conjunto motor-caja reductora requerido debe cumplir como mínimo con las condiciones indicadas anteriormente.

Entre las posibilidades encontradas para la selección se tiene 3 opciones (Tabla2.2):

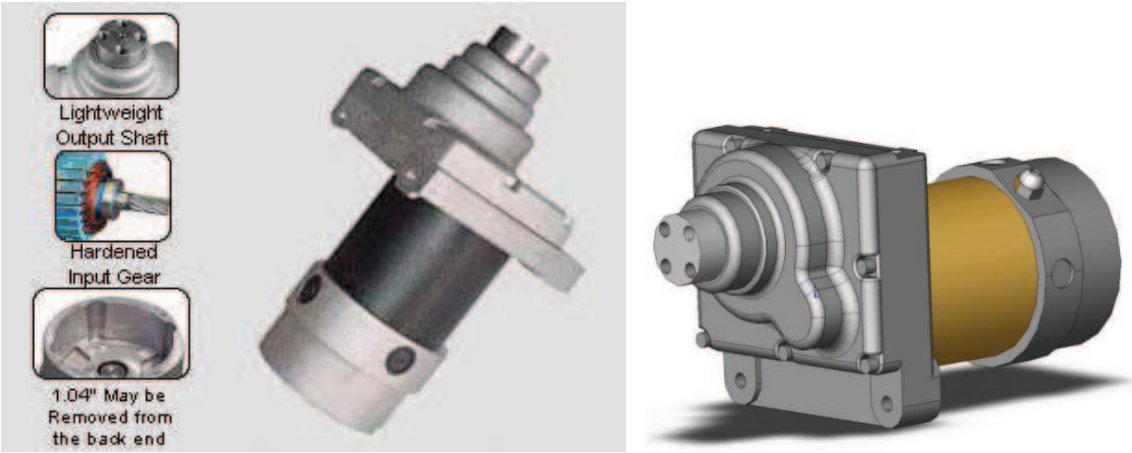
	BANEBOTS	**NPC Robotics**	**Fun-components**
Voltaje	6-12	24v	24v
Potencia	----------	1200W	500W
Rpm motor	5310	4700	----------
Gear-Box	27:1**	20:1	----------
Peso	9lb	13lb	----------
Torque	65Nm	93.2Nm	40Nm
En bodega	SI	SI	NO
Precio	425	440	196*

*sin aranceles
**no incluye caja reductora

Tabla 2.2: Caracteristicas de motores a escoger

El motor que ofrece BANEBOTS es pequeño y liviano reduciendo de esta manera el peso total del sistema lo que sería muy conveniente por espacio y ahorro de las baterías; sin embargo, la caja reductora que se podría adquirir se vende por separado y es necesario realizar adaptaciones mecánicas para montarla. Por otro lado, se tiene el de NPC Robotics que vende un kit motor- caja reductora que cuenta con un torque alto pero con un mayor peso. La tercera opción es el motor que presenta FUN-Components, se observa que su torque y su potencia no son lo suficientemente grandes para los fines de este proyecto, además de que no se encontraban en bodega en ese momento. El precio no nos da una referencia para escoger uno de ellos ya que es similar. Es importante considerar que es mejor trabajar con la caja reductora ya instalada en el motor para disminuir los problemas mecánicos que puedan ocurrir al tratar de acoplarla con el mismo.

Adicionalmente debe pensarse en la adquisición de llantas y bridas de acople entre llantas y el conjunto motor-caja reductora. Se optó finalmente por el kit de NPC Robotics ya que los implementos adicionales se venden listos para montaje y utilización, lo que disminuye tiempos de desarrollo. Como una ventaja extra el kit de NPC-Robotics es para sillas de ruedas, lo que implica que su costo de importación no es tan alto, debido a que su importación es libre de aranceles. Por este motivo se adquirió el conjunto motor-caja reductora, llantas y baterías de la misma casa.



a) b)

Figura 2.7: Motor **a)** real; **b)** Solidworks

Por lo mencionado anteriormente, para la tracción del vehículo se ha seleccionado el motor de NPC Robotics, que son motores de 24V con caja reductora de relación 20:1. El modelo del motor seleccionado es NPC-T64, de NPC Robotics (Figura 2.7). Como son motores de sillas de ruedas, son de trabajo pesado. La frecuencia del PWM de control debe estar entre 100Hz y 1KHz [23].

En la Tabla 2.3 están las relaciones de torque, corriente, potencia y velocidad, tomado de [24].

Torque en Libras fuerza * pulgada	**Amperios**	**RPM**	**HP**
30	8.6	238	0.11
60	12.5	230	0.22
90	16.2	225	0.32
120	20.0	218	0.41
150	23.5	211	0.52
180	27.5	206	0.62
210	31.6	200	0.71
240	35.1	194	0.81
270	39.2	187	0.89
300	43.1	181	0.95
825	110	Parada	

Tabla 2.3: Valores característicos del motor

Su velocidad nominal es de 235rpm. En la mayoría de aplicaciones es posible manejarlo con 36Vdc, lo que incrementa la velocidad en un 50% y la potencia en un 60%. Es un motor bidireccional. Las características del motor se presentan en la Tabla 2.4.

Características	Valor	Unidad
Tipo	Imán Permanente	
Velocidad en vacío	235	RPM
Potencia	1.6	HP
Peso	13	Lb

Tabla 2.4: Características del motor, tomado de [24].

2.1.5 TORNILLOS DE SUJECCIÓN

Se han seleccionado diferentes tipos de tornillos, en base a las necesidades de dureza y resistencia. Así se tiene los siguientes:

- Sujeción de los adaptadores al eje del motor (para cada motor)
  4 tornillos 5/16-24-UNF de longitud 25 mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912.
- Sujeción de los adaptadores a la llanta de la rueda (para cada rueda)
  4 tornillos 5/16-24-UNF de longitud 16 mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912.

Finalmente, vale la pena recalcar que para la construcción mecánica del sistema se ha tomado en consideración realizar un diseño en el cual el centro de gravedad del vehículo quede lo más bajo posible jugando con la distribución de los elementos disponibles, con el objeto de dar un poco más de estabilidad al vehículo.

2.2 SISTEMA ELECTRÓNICO

2.2.1 UNIDAD INERCIAL DE NAVEGACIÓN

Una unidad inercial de navegación (Inertial Measurement Unit IMU) es un dispositivo electrónico que mide y reporta la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de una nave, usando una combinación de sensores, entre los cuales están: giróscopos, magnetómetros y acelerómetros [25]. La IMU es un

componente fundamental en los sistemas de navegación inercial de aeronaves, naves espaciales, barcos, misiles guiados, entre otros. La IMU incluye además un microprocesador que ejecuta un algoritmo (por lo general, un Filtro Kalman Extendido) para devolver los valores estimados de posición, conocidos como ángulos: alabeo, cabeceo y guiñada (Figura 2.8).

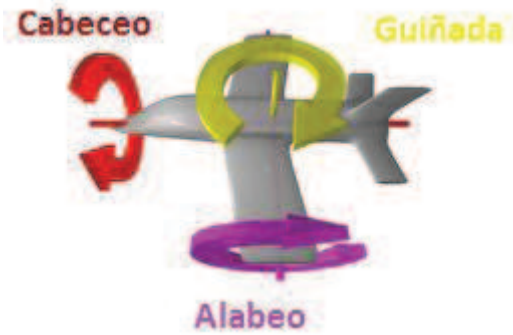


Figura 2.8: Ángulos alabeo, cabeceo y guiñada

El sensor escogido para la presente aplicación por sus prestaciones y costo económico es el CHR-6dm AHRS comercializado por la empresa norteamericana CH Robotics [26] (Figura 2.9). Las características más importantes de este sensor son:

- Cuenta con un procesador ARM Cortex de 32bits que ejecuta un Filtro Kalman Extendido (EKF) para estimar los ángulos alabeo, cabeceo y guiñada.
- Calibración automática del offset del giroscopio.
- Frecuencia ajustable de la salida de los valores entre 20 y 300Hz.
- Regulador de 3.3V.
- Cuenta con 2 UARTs y un bus SPI.
- Exactitud en la estimación del ángulo: menor a 0.1 grados.
- Resolución de cada ángulo: 16 bits.
- +/- 400grados/seg es la máxima tasa medible de velocidad angular.
- +/- 3g es la máxima aceleración medible.

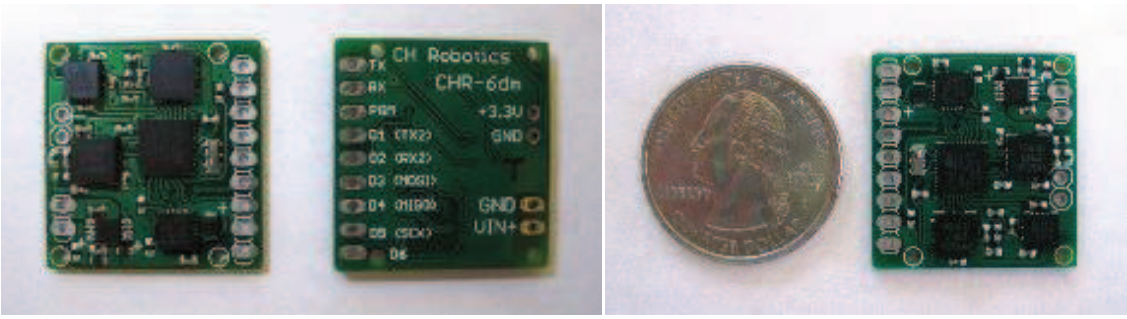


Figura 2.9: Sensor IMU CHR-6dm AHRS

Este equipo requiere de calibración, debido a que el campo magnético en los diferentes sitios de la Tierra varía un poco, y por tanto los magnetómetros deben ser calibrados. Esto se realiza conectando la IMU al PC y un software realiza automáticamente el ajuste de las diferentes matrices y valores de offset de los diferentes elementos.

Explicación de funcionamiento

El acelerómetro es como su nombre lo dice, un sensor de aceleración. Este sensor permite estimar la inclinación en condiciones de reposo, ya que basa su medición en la gravedad (Figura 2.10).

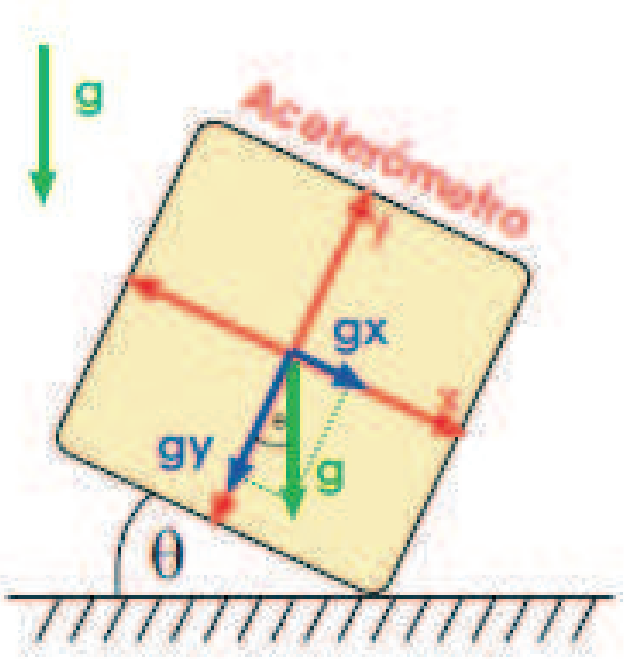


Figura 2.10: Medición de ángulo con acelerómetro

Este sensor no puede distinguir entre aceleraciones externas aplicadas y la gravedad. Por tanto, en presencia de aceleraciones externas, como las producidas por los motores, no será posible realizar una buena estimación de la inclinación [27].

En estado de reposo, empleando las relaciones trigonométricas del triángulo formado por “gx”, “gy” y “g” es posible determinar el ángulo de inclinación (Figura 2.10).

Un giróscopo es un sensor que permite medir la velocidad angular o tasa de cambio de la inclinación. Para determinar la inclinación, a partir de las mediciones de este sensor, será necesario conocer la condición inicial del ángulo e ir integrando paso a paso la velocidad medida por el sensor. Las aceleraciones externas y la aceleración debida a la gravedad no afectan a este sensor. El problema es evidente con este sensor, el integrar una cantidad durante un largo tiempo, genera errores, que en el caso de este sensor se vuelven considerables después de cierto tiempo.

Ambos sensores presentan ventajas y desventajas. Lo bueno es que es posible combinar ambas mediciones aprovechando lo mejor de cada sensor. Así a largo plazo el acelerómetro no presenta los errores del giróscopo, pero es afectado por las aceleraciones externas; mientras que el giróscopo no tiene problema con las aceleraciones, es decir, su estimación a corto plazo es buena, pero a largo plazo existen los problemas de la integración. Por tanto una combinación lineal de las mediciones de los sensores sería la siguiente:

$$\theta_t = \left(\theta_{t-1} + \dot{\theta}t\right)\alpha + \theta_{acc}(1-\alpha)$$

Donde:

θ_t: Valor estimado de la inclinación al tiempo “t”.

θ_{t-1}: Estimación anterior de la inclinación, es decir, estimación en el tiempo “t-1”.

θ_{acc}: Valor de la inclinación medido por el acelerómetro.

$\dot{\theta}$: Valor de la velocidad angular medido por el giróscopo.

t: Tiempo transcurrido entre la medición actual y la anterior.

α: Valor entre 0 y 1, que representa el peso relativo de importancia de cada medición en la estimación del ángulo de inclinación.

Lo importante es saber asignar los pesos de acuerdo a la varianza de las mediciones de cada sensor.

2.2.2 CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA MOTORES DC

El controlador seleccionado es el OSMC (Open Source Motor Control por sus siglas en inglés) que lo comercializa The Robot Market Place.

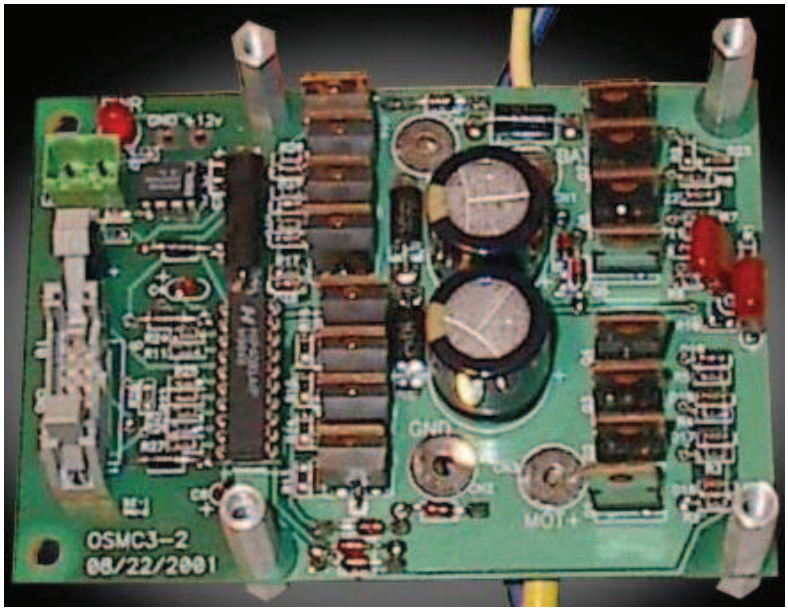


Figura 2.11: Controlador de motor

Este controlador es un puente H de gran potencia diseñado para controlar motores DC de imán permanente. Este controlador sirve para controlar motores DC de robots de batalla, por ello es capaz de soportar grandes picos de corriente y potencia por lapsos pequeños, tiene un peso ligero, una interfaz simple y soporta la vibración; por todo esto se lo considera adecuado para la presente aplicación (Figura 2.11).

A diferencia de otros controladores de velocidad, éste no emplea disipadores para la extracción de calor, sino que usa un ventilador para remover el calor. Emplea como entrada una señal PWM, por lo que puede ser comandado fácilmente por cualquier microcontrolador con la precisión con la que el microcontrolador pueda generar el PWM. Para esta aplicación el PWM que genera el microcontrolador puede variar entre 0 y 1023.

Algunas de las características técnicas de este driver se muestran en la Tabla 2.5.

Características	Valores
Voltaje de alimentación	13V-50V
Corriente de salida (continua)	160A.
Corriente de salida (pico)	400A.
Peso	0.6 libras.
MOSFETs	16 IRF1404 o IRF1405
Ventilador (Figura 2.11)	40CFM de capacidad 24V 0.15ª
Manejador del puente	Intersil HIP4081A
Alimentación de la electrónica	12V 0.5A con regulador.

Tabla 2.5: Características del controlador OSMC, tomado de [28].

El controlador de potencia seleccionado permite manejar los motores seleccionados en todo su rango de velocidad, su capacidad de corriente soporta y excede la corriente del motor y es capaz de funcionar en ambientes cerrados como el de esta aplicación.

Figura 2.12: Ventilador del controlador

2.2.3 EQUIPO AUXILIAR: CARGADOR DE BATERIAS

El cargador de baterías seleccionado permite recargar a la vez a las dos baterías de 12V. El modelo seleccionado es el NPC-C2409 que provee 24V y su corriente de carga 4A. Puede ser alimentado desde cualquier toma (60-264Vac). Es completamente automático, una vez que las baterías se encuentran cargadas, se pone en modo standby. Es el cargador comercializado recomendado por NPC Robotics para el tipo de baterías empleadas.

Figura 2.13: Cargador de baterías NPC-C2409

La eficiencia del cargador es del 20%, por lo que el tiempo de carga es el siguiente:

$$Tiempo\ Carga = \frac{14Ah}{4A} * \frac{1}{0.8} = 4.375\ horas$$

2.2.4 PROTECCIONES: FUSIBLES Y BREAKER

Para protección general se usa un Breaker doble de 50A en línea con la alimentación principal de potencia de cada controlador. De acuerdo a mediciones realizadas durante las pruebas se ha determinado que la corriente no sobrepasa este valor bajo condiciones normales de funcionamiento. Además se usan fusibles independientes para proteger a la placa, donde se encuentra el sistema de control, y al sensor. El fusible de la placa tiene un valor de 500mA, mientras que el del sensor es de 100mA. Estos fusibles son tipo Europeo, es decir pequeños fáciles de colocar en un porta fusibles para placa.

2.2.5 ENCODER DE CUADRATURA

Es un sensor comúnmente usado para medir tanto posición como velocidad angular. El sensor empleado para el vehículo auto-balanceado es un encoder óptico de cuadratura comercializado por VEX Robotics. Este tipo de encoders entregan dos señales de salida, las cuales son señales con forma de onda cuadrada desfasadas entre sí 90°, lo cual permite determinar la posición y dirección de rotación (Figura 2.14).

Figura 2.14: Encoder de cuadratura

Algunas de las características técnicas de este encoder son [29]:

- La rueda del encoder tiene 90 slots por revolución. Lo que implica una resolución de 4 grados.
- El encoder es capaz de detectar hasta 1700 pulsos por segundo, lo que corresponde a 1133 rpm. Si la velocidad de giro es mayor, las mediciones no serán del todo correctas.
- El sensor emplea lógica digital, es decir para cero y uno lógico se emplean voltajes TTL (0-5V)

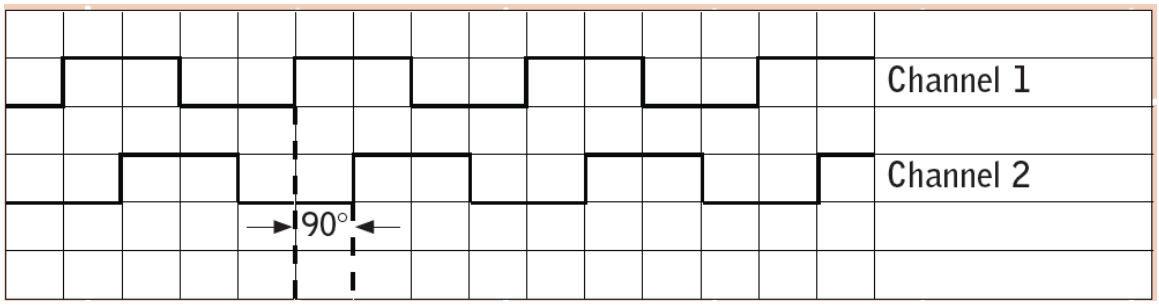


Figura 2.15: Formas de onda de los canales del encoder

Lógica de las señales

Si el canal 1 adelanta al canal 2, la rueda está rotando en el sentido de las agujas del reloj. Si el canal 2 adelanta al canal 1, la rueda está girando en el sentido contrario a las agujas del reloj (Figura 2.15).

Monitoreando la fase relativa y el número de pulsos de los canales 1 y 2 se puede determinar cuán rápido y en qué dirección se está girando.

El encoder para esta aplicación no necesita ser de gran número de slots, debido a que se lo instala en el lado de alta velocidad del motor, ello implica que el número de pulsos por vuelta de la llanta sea igual al número de slots del encoder por la relación de la caja reductora, en este caso 1800 pulsos por cada vuelta de la llanta, lo que representa una resolución de 0.2 grados.

2.2.6 MICROCONTROLADORES

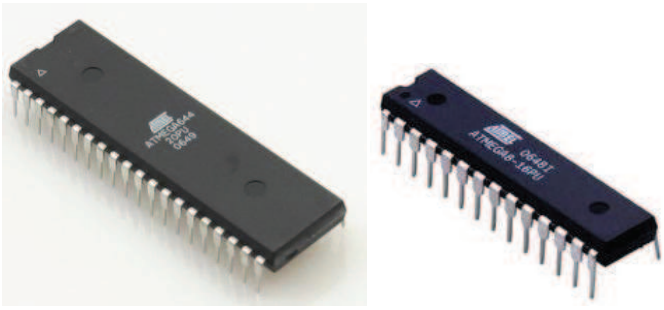
La selección del microcontrolador se basa en factores como el número de pines requeridos para la aplicación y tamaño de la memoria. En la Tabla 2.6 se muestra los periféricos que serán conectados al microcontrolador principal de acuerdo con el número de entradas y salidas a usar. Esto permitirá determinar el número de pines que se requieren, lo que permite escoger el microcontrolador adecuado para la aplicación.

Cantidad	Periféricos	Entrada	Salida
2	Controlador de motor DC		4
1	LCD		7
2	ENCODER	4	
1	Sensor de ángulo IMU	1	
1	Señal Analógica de 0-5v	1	
2	Jumper	2	
1	Atmega8	5	
Pines entradas y salidas		13	11
TOTAL		**24**	

Tabla 2.6: Periféricos del microcontrolador Atmega644P

Por consiguiente se usa el microcontrolador atmega644P (Figura 2.16a) como microcontrolador principal, por las siguientes razones:

- Tiene 32 pines configurables como entradas y salidas.
- La memoria RAM es de 4kBytes para manejar varias interrupciones.
- Comunicación RS-232
- Entradas Analógicas



a) b)

Figura 2.16: a) atmega644P **b)** atmega8, tomado de [30].

El atmega8 (Figura 2.16b), es usado como un microcontrolador auxiliar para no saturar al microcontrolador principal con excesivas tareas. Su función principal es la de enviar la petición de dato al sensor de inclinación IMU por comunicación serial. Los periféricos relacionados con el microprocesador atmega8 se encuentran en la Tabla 2.7.

Es importante mencionar que los datos del atmega8 son recibidos por el atmega644P por medio de comunicación paralela, de forma unidireccional y por 5 líneas de transmisión. En el diseño de las placas se puede apreciar la distancia mínima de un microcontrolador al otro para evitar errores de comunicación [31].

Cantidad	Periféricos	Entradas	Salidas
1	Led		1
2	Pulsadores	2	
1	Sensor de inclinación IMU		1
1	Atmega644		5
Pines entradas y salidas		2	7
TOTAL		**9**	

Tabla 2.7: Periféricos del microcontrolador Atmega8

En la Tabla 2.8 se muestra la asignación de los pines del microprocesador Atmega644P y en la Tabla 2.9 la del Atmega8. Los pines sin conexión no se muestran en las tablas.

En los pines de polarización al microcontrolador se encuentra conectado en paralelo un capacitor cerámico C_6 = 0.1uF para filtrar el ruido.

Se colocaron también capacitores cerámicos entre cada pin del oscilador y tierra (GND) C_2 y C_3= 15pF.

En el pin AREF se colocó un capacitor de 0.1uF a tierra. Este capacitor se lo coloca por recomendación del fabricante cuando se emplea la conversión analógica digital [32].

PUERTOS	DISTRIBUCIÓN DE PINES	ASIGNACIÒN	Entrada	Salida
Puerto A	PA6 (pin 34)	Jumper, señal analógica de calibración de constantes o voltaje de batería	**X**	
Puerto B	PB0 (pin 1)	LCD, canal Reset		**X**
	PB1 (pin 2)	LCD, canal Read/Write		**X**
	PB3 (pin 4)	LCD, canal Enable		**X**
	PB4 (pin 5)	LCD, canal DB4		**X**
	PB5 (pin 6)	LCD, canal DB5		**X**
	PB6 (pin 7)	LCD, canal DB6		**X**
	PB7 (pin 8)	LCD, canal DB7		**X**
Puerto C	PC0 (pin 22)	PP1, comunicación con Atmega8	**X**	
	PC1 (pin 23)	PP2, comunicación con Atmega8	**X**	
	PC2 (pin 24)	PP3, comunicación con Atmega8	**X**	
	PC3 (pin 25)	PP4, comunicación con Atmega8	**X**	
	PC4 (pin 26)	PP5, comunicación con Atmega8	**X**	
	PC5 (pin 27)	Constante Kp del control PD		
	PC6 (pin 28)	Encoder M. derecho, señal de giro	**X**	
	PC7 (pin 29)	Encoder M. izquierdo, señal de giro	**X**	
Puerto D	PD0 (pin 14)	Sensor IMU, Recibe dato	**X**	
	PD1 (pin 15)	Constante Kd del control PD	**X**	
	PD2 (pin 16)	Encoder M. izquierdo, contador	**X**	
	PD3 (pin 17)	Encoder M. derecho, contador	**X**	
	PD4 (pin 18)	Señal PWMA, motor izquierdo		**X**
	PD5 (pin 19)	Señal PWMB, motor derecho		**X**
	PD6 (pin 20)	Señal de control motor derecho		**X**
	PD7 (pin 21)	Señal de control motor izquierdo		**X**
	Pin 9	VCC (5v)		
	Pin 10	VCC (5v)		
	Pin 11	GND (0v)		
	Pin 12	Oscilador externo 11,059200Mhz		
	Pin 13	Oscilador externo 11,059200Mhz		
	Pin 30	VCC (5v)		
	Pin 32	Capacitor de 1uf		

Tabla 2.8: Distribución de pines atmega644P

De la misma forma que con el microprocesador Atmega644P, se conectó al Atmega8 capacitores cerámicos en la polarización y en los pines del cristal externo $C_{7,}$ C_4 y C_5 respectivamente.

PUERTOS	DISTRIBUCIÓN DE PINES	ASIGNACIÒN	Entrada	Salida
Puerto C	PC0 (pin 23)	PP1, comunicación con Atmega644		**X**
	PC1 (pin 24)	PP2, comunicación con Atmega644		**X**
	PC2 (pin 25)	PP3, comunicación con Atmega644		**X**
	PC3 (pin 26)	PP4, comunicación con Atmega644		**X**
	PC4 (pin 27)	PP5, comunicación con Atmega644		**X**
	PC5 (pin 28)	Voltaje de batería, señal analógica	**X**	
Puerto D	PD1 (pin 3)	Sensor IMU, Transmisión de datos		**X**
	PD2 (pin 4)	Pulsador de Giro Derecha	**X**	
	PD3 (pin 5)	Pulsador de Giro Izquierda	**X**	
	PD4 (pin 6)	LED1 Batería Baja		**X**
	Pin 1	Reset a VCC		
	Pin 7	VCC		
	Pin8	GND		
	Pin 9	Oscilador externo 11,059200Mhz		
	Pin 10	Oscilador externo 11,059200Mhz		
	Pin 20	VCC		
	Pin 21	Capacitor 1uf		

Tabla 2.9: Distribución de pines atmega8

El algoritmo de control se ejecutará cada 10ms, es decir, a una frecuencia de 100Hz [33], tal como funciona un Segway real. Para pequeñas inclinaciones y movimientos lentos, el vehículo es aún capaz de mantenerse estable con frecuencias menores a 100Hz; sin embargo, para ángulos de inclinación grandes el desempeño del vehículo no es óptimo, por lo tanto, no es conveniente trabajar a una frecuencia por debajo de los 100Hz. No vale la pena tampoco realizar el control a mayor frecuencia, porque por una parte están las limitaciones en el tiempo de respuesta de los motores que se encuentra en el orden de los milisegundos, y por otra parte se requeriría mayor poder de procesamiento de los microcontroladores, lo que obligaría a ocupar una tecnología de mejores prestaciones como los XMEGA.

2.2.7 LCD (LIQUID CRYSTAL DISPLAY)

Adicionalmente se emplea un LCD para desplegar la información deseada del estado actual del vehículo.

Esta herramienta se ha utilizado durante el desarrollo del prototipo para visualizar la información de parámetros de calibración como las constantes kp, ki y kd; velocidad del vehículo; ángulo de inclinación, voltaje aplicado a los motores, entre otros. El LCD empleado es un LCD de 16 caracteres, 2 líneas.

Figura 2.17: LCD empleado para visualización del estado del vehículo

2.3 INTEGRACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL VEHÍCULO

Existen dos partes claramente diferenciadas en cuanto a la construcción del prototipo se refiere. La primera de ellas es el montaje de la parte mecánica, entendiéndose por sistema mecánico a la estructura de hierro negro, barras de soporte laterales, motores, baterías y llantas.

La segunda parte es el montaje e instalación de los diferentes componentes electrónicos de control, que comprenden la placa de control, los controladores de potencia de motores y sensores.

2.3.1 MONTAJE DE LA ESTRUCTURA

Para el diseño mecánico del prototipo del vehículo se ha utilizado el software Solidworks. Durante la construcción fue necesario realizar ciertos cambios para darle más robustez y mejorar la funcionalidad del vehículo.

Para la construcción del prototipo se han considerado varios factores como los siguientes:

- Ubicar el centro de gravedad del vehículo lo más cercano posible al piso, para darle al vehículo un poco más de estabilidad. Además es muy importante la distribución de los elementos, de modo que sea posible que el centro de gravedad del vehículo coincida con el eje de los motores.

  Esto no es posible conseguir de forma muy precisa, pero ayuda a que el vehículo pueda mantenerse en reposo cuando se desee. Esto se lo realizó mediante simulación obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 2.18.

  En color rosado se ve el centro de gravedad del vehículo. Es posible apreciar como al menos en simulación, el centro de gravedad está ubicado de forma apropiada.

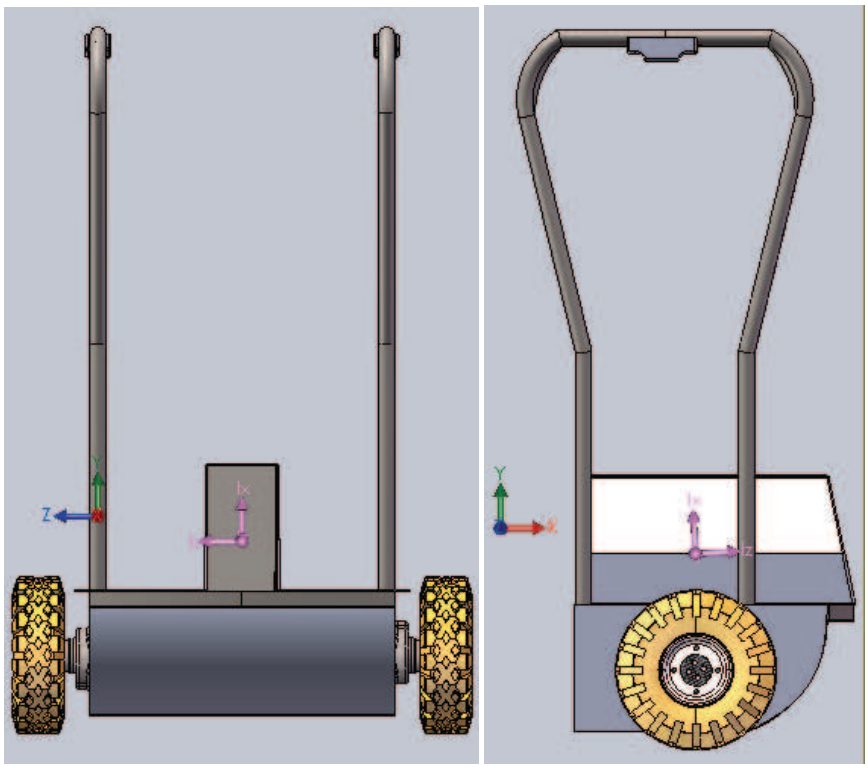


Figura 2.18: Centro de gravedad

- Se ha construido el vehículo tomando en cuenta que su ancho sea menor al ancho de una puerta normal, de modo que sea posible desplazarse tanto por lugares abiertos como por lugares cerrados en los que es necesario atravesar

puertas. Por consiguiente, el ancho del vehículo será como máximo 80cm incluyendo la base del conductor y las llantas.

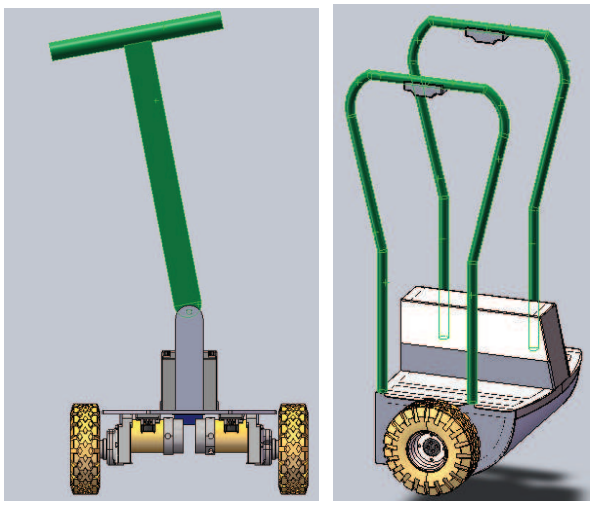
- Se construyó una caja metálica que contenga a las baterías para que no tengan ningún contacto con el conductor. Esto se implementa como un sistema de seguridad. Las baterías son importantes porque dan autonomía al vehículo, alimentándolo a través de los controladores de potencia.

- No se ha tomado en cuenta a detalle la optimización del peso del vehículo, pero se ha considerado que su peso máximo no exceda los 55kg o aproximadamente 120lb. El peso de un Segway comercial equipado es un poco mayor a 120lb, por lo que se planteó como meta inicial no superar este peso en el prototipo.

Figura 2.19: Segway **a)** real **b)** Solidworks

- Existen dos generaciones de Segway, los que tienen volante fijo y los que tienen volante de dirección que gira. Se pensó construir este prototipo en un principio con volante giratorio para el mando de la dirección. De color verde se puede ver el volante que se conoce como “Lean Steering” en la Figura 2.20a.

Sin embargo, con el propósito de mejorar la biomecánica del vehículo se decidió construir dos barras laterales, que permitirán al conductor conservar su equilibrio y le darán mayor seguridad, con lo que será posible que el vehículo se desplace más rápido (Figura 2.20b).



a) b)

Figura 2.20: Segway **a)** Idea original; **b)** Idea final

- La estructura metálica tiene como objetivo también, proteger a la electrónica del vehículo, dándole robustez.

- Para evitar problemas de ruido se ha decidido colocar tanto a los controladores de potencia como a la tarjeta electrónica de control en un ambiente metálico independiente, que sirva además de protección ante golpes. Esto permite aislar en cierta forma el ruido electromagnético generado por los motores.

- Los motores son uno de los componentes primordiales en el vehículo, su correcta alineación, instalación y montaje permitirá controlar físicamente al sistema.

- La base es el componente principal de la estructura. Ella será la que soporte al conductor y sobre ella se montarán los diversos componentes.

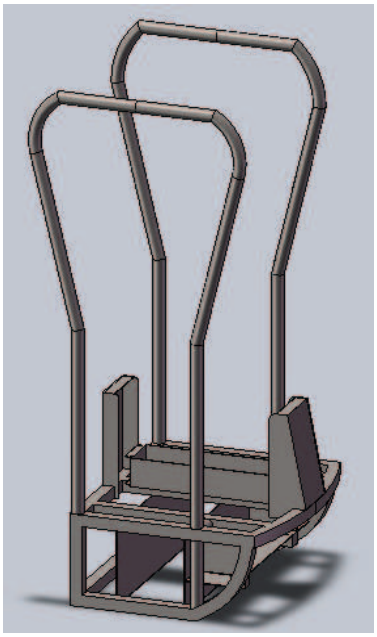
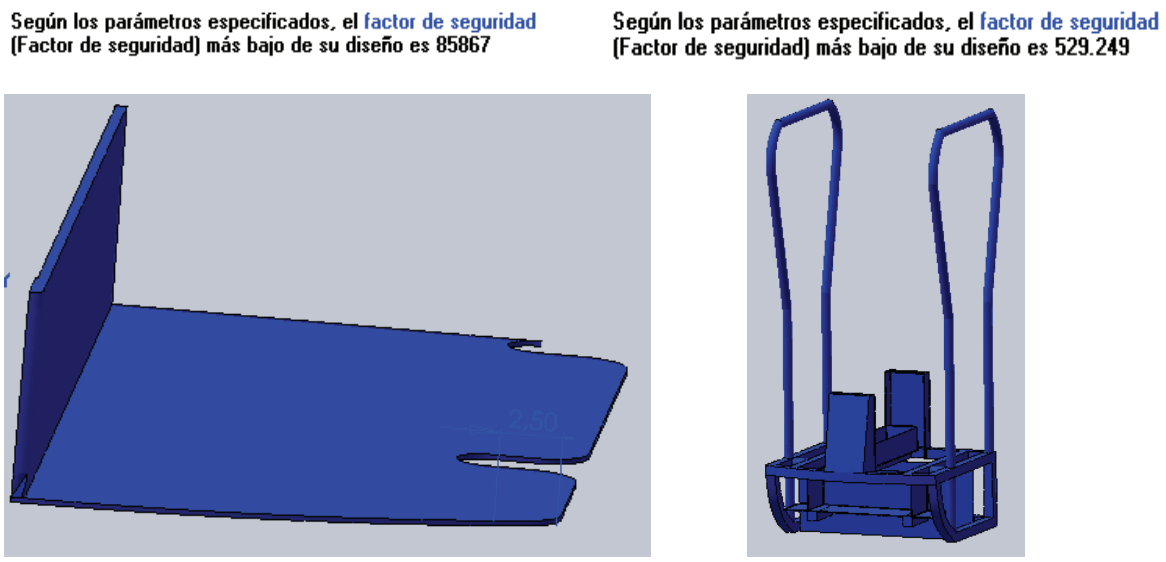


Figura 2.21: Base o estructura del prototipo

- El material con el que se pensó construir la estructura inicialmente es el aluminio por varias razones. Entre ellas están que es un material mucho más ligero que otros metales, por lo que permitirá reducir el peso total del vehículo. Además es un material resistente si se compara con plásticos. Es un material dúctil, al cual es posible moldear para formar la estructura. Finalmente, es importante también que sea un material no magnético, ya que de este modo no causa interferencia al sensor de inclinación que posee magnetómetros. Debido a problemas al momento de soldar aluminio con otros elementos, se cambió el material de construcción a acero inoxidable mate porque es no magnético, mucho más resistente; sin embargo, como resulta muy caro, se decidió finalmente construir la estructura con hierro negro, que es un material muy resistente también. Este es magnético, por lo que fue preciso realizar una calibración magnética del sensor IMU.

Los planos de las piezas diseñadas se encuentran en el Anexo 3 y los pasos realizados para el montaje en el Anexo 2.

Adicionalmente es importante realizar un análisis mecánico de las diferentes piezas, para determinar si los diseños tendrán el rendimiento deseado bajo ciertas condiciones; es decir, si la pieza se deformará o se romperá al aplicar determinado peso. Las piezas más importantes son la estructura y la base sobre la cual se para la persona. Las Figuras 2.22a y 2.22b muestran los resultados del análisis mediante Solidworks.



a) b)

Figura 2.22: a) Lámina de soporte de hierro; **b)** Estructura de hierro

Un factor de seguridad mayor a 1 en el diseño, significa que el material no ha cedido; es decir, el diseño es seguro. En este caso, los valores del factor de seguridad de ambas piezas son altos, ya que la estructura del vehículo se construyó de una sola pieza, lo más robusta posible.

2.3.2 MONTAJE DEL HARDWARE

Electrónica de control y sensores

En este tema se tratará los elementos y circuitos presentes en la tarjeta electrónica de control como sensores, microcontroladores, sistema de

comunicación, fuente de energía, entre otros. A continuación se detalla el diseño de los diferentes circuitos.

La fuente de energía principal son dos baterías de 12V en serie, que dan como resultado una fuente de 24Vdc. Los controladores de potencia seleccionados se alimentan con 24Vdc directamente de los terminales de las baterías. Estos controladores entregan a los motores el voltaje correspondiente de acuerdo a las señales de control dadas por el microcontrolador; es decir, entregan a los motores un voltaje comprendido entre 0 y 24V.

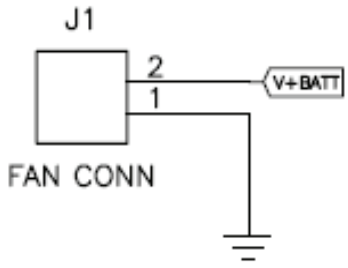


Figura 2.23: Alimentación del ventilador con 24Vdc

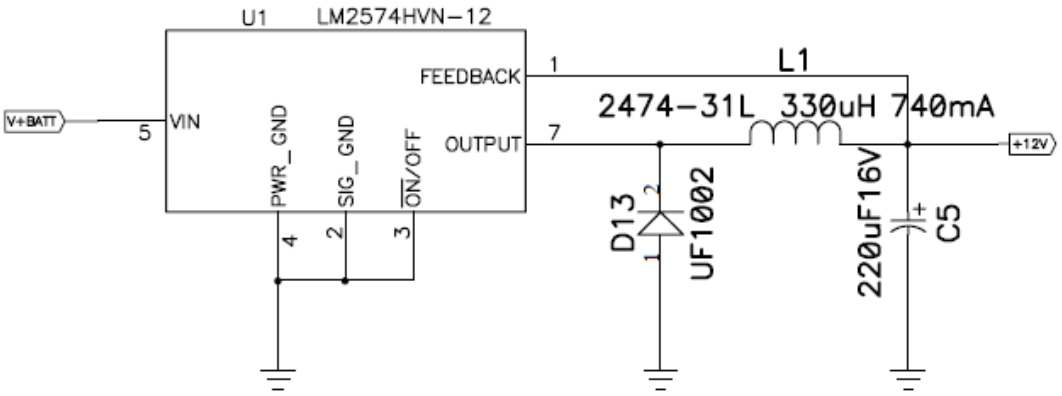


Figura 2.24: Regulador de 12V del controlador OSMC

Además con estos 24V, el controlador de potencia alimenta un ventilador (Figura 2.23). El controlador OSMC cuenta con un regulador de 12V, que permite obtener el voltaje adecuado para manejar los MOSFETs que componen su puente H. Este regulador es parte del controlador de potencia y es un regulador tipo fuente

switching, más eficiente que un regulador LM7812. La configuración utilizada es la recomendada en la hoja de datos del regulador LM2574HVN-12 (Figura 2.24).

En forma general la tarjeta electrónica cuenta con los componentes que se presentan en la Figura 2.25.

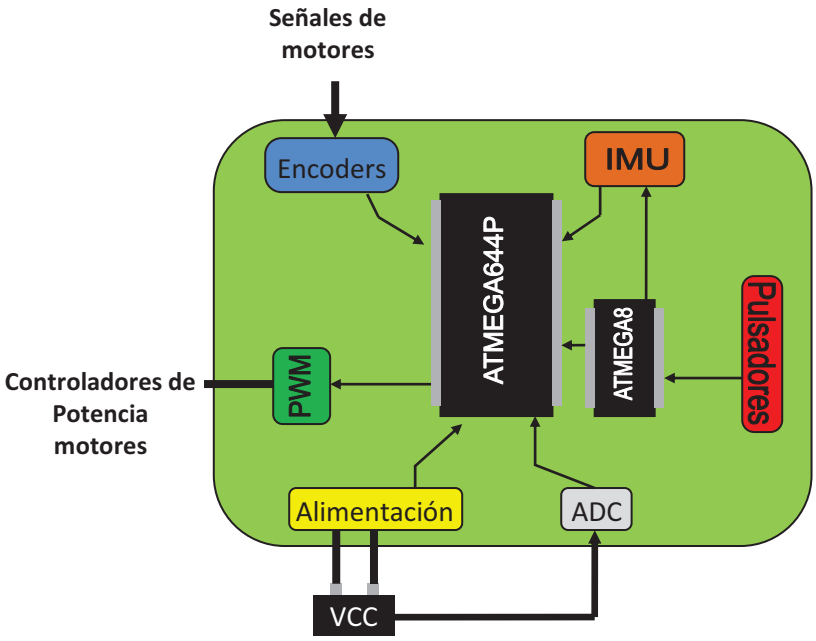


Figura 2.25: Diagrama de elementos de la placa de control

La tarjeta de control es alimentada únicamente por una batería; es decir, con 12V, los cuales pasan a través de un puente de diodos, el cual tiene como propósito evitar problemas por cambio de polaridad en la alimentación en caso de conectar mal los terminales de la batería a la tarjeta de control (Figura 2.26).

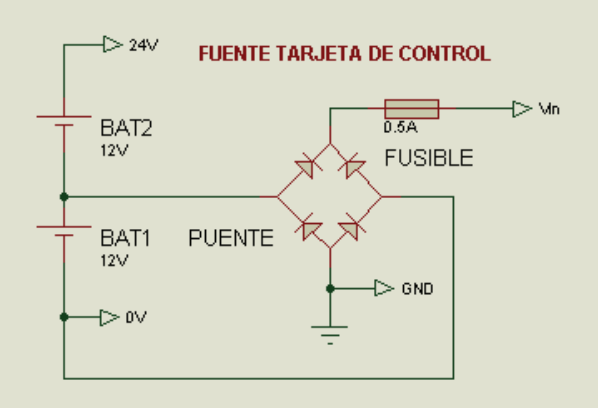


Figura 2.26: Alimentación de la tarjeta de control

Para el dimensionamiento del fusible de protección y del puente de diodos se toma en cuenta los principales dispositivos que se debe alimentar, entre los cuales destacan microcontroladores, LCD, compuertas lógicas, sensor IMU, encoders y salidas para los controladores de potencia. La corriente usada por el circuito no supera el medio amperio, por lo que se usa un fusible de 0.5A, como protección del circuito. El puente de diodos se lo selecciona del mínimo valor que se consigue comercialmente (2A).

Existe una bobina que une la tierra de control con la tierra de potencia, la cual tiene como propósito, evitar que las fluctuaciones de corriente en la parte de potencia afecten al circuito de control (Figura 2.27).

Figura 2.27: Bobina

El sensor de mediciones inerciales IMU se alimenta con un voltaje que puede estar comprendido entre 3.3 y 12V, sin embargo se ha colocado un regulador de voltaje variable para alimentarlo con 3.3V, debido a que durante las pruebas hubo problemas al entregar un voltaje mayor. La configuración empleada es la recomendada por el fabricante en la hoja de datos del integrado LM317 (Figura 2.28) [34].

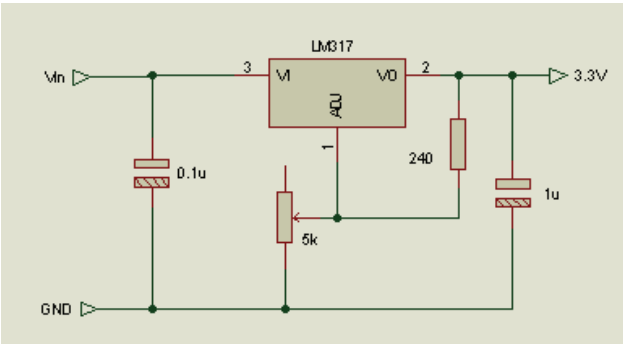


Figura 2.28: Fuente variable para obtener 3.3V

Los demás componentes electrónicos, como microcontroladores, encoders, dispositivos de comunicación serial, compuertas lógicas se alimentan con 5V provenientes de un regulador en circuito integrado de 5V (LM7805). Este regulador requiere de dos capacitores electrolíticos, uno a la entrada y otro a la salida para filtrar ruido de alta frecuencia, cuyos valores son los recomendados por el fabricante y son los que se indican en la Figura 2.29. Se emplean también capacitores electrolíticos para amortiguar cambios de voltaje que pudieran presentarse. Se emplea este regulador, ya que tiene protección térmica interna contra sobrecargas y protección contra cortocircuito.

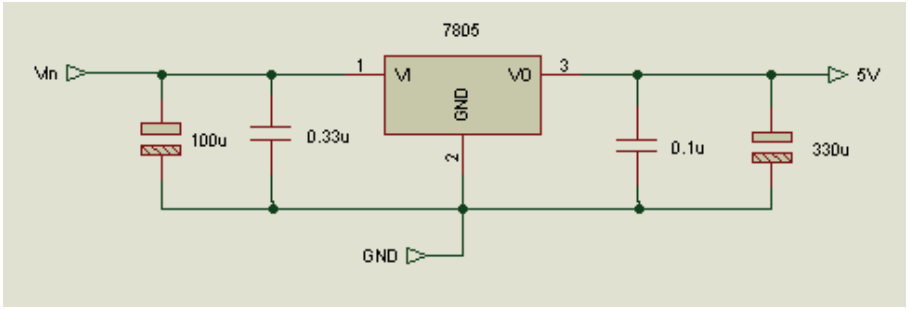


Figura 2.29: Fuente de 5V

El microcontrolador seleccionado es el Atmega644P, capaz de comunicarse con los diversos sensores, generar las señales PWM y realizar los cálculos necesarios para el control de los motores a una frecuencia mínima de 100Hz, que permite estabilizar al vehículo.

Para la medición de la inclinación y la tasa de cambio de dicha inclinación se ha seleccionado como sensor una Unidad Inercial de Medida, la cual entrega los valores deseados mediante comunicación serial.

En el caso del sensor IMU, se tiene que asignar adecuadamente los valores de confianza de cada sensor y del proceso para estimar adecuadamente los parámetros necesarios para el control.

Así por ejemplo cuando se asigna un valor bajo a la varianza del acelerómetro se aprecia como las vibraciones afectan de manera evidente a la estimación del EKF, mientras que al aumentar el valor de su varianza, las vibraciones afectan con menor fuerza a la estimación. El calibrar la varianza indica el grado de confianza que se tiene en cada sensor. Así el asignar un valor pequeño de varianza a la medición de un sensor implica un alto grado de confianza en el mismo y viceversa.

La comunicación serial entre los microcontroladores y el sensor IMU se debe realizar a 115200 baudios, ya que el sensor funciona a esta velocidad. Esto impone una restricción en el cristal que deben usar los microcontroladores. Para que el error en la comunicación sea de forma teórica 0%, el cristal a utilizar será de 11,0592Mhz.

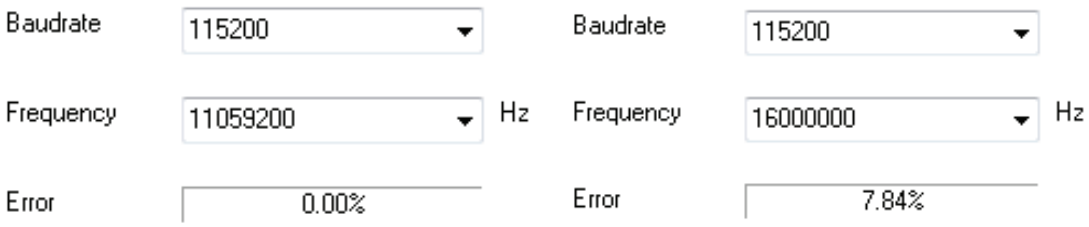


Figura 2.30: a) Error con cristal de 11,0592MHz; **b)** Error con cristal de 16MHz

El fabricante recomienda colocar capacitores cerámicos entre cada uno de los pines del cristal y tierra. El valor de estos capacitores debe estar comprendido entre 12 y 22pF, para el rango de frecuencias entre 0.9 y 16MHz [32].

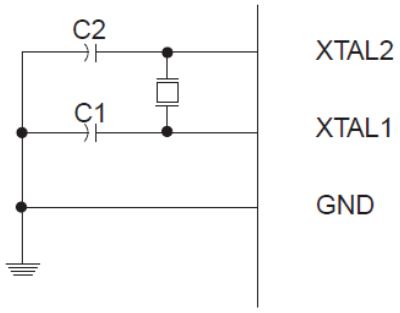


Figura 2.31: Esquema de conexión del cristal al microcontrolador

El microcontrolador Atmega644P y el microcontrolador Atmega8 se conectan al sensor de medición inercial IMU, únicamente a través de un pin cada uno.

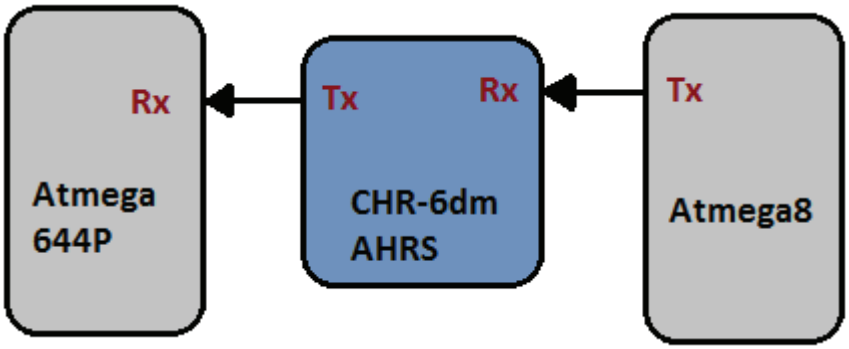


Figura 2.32: Comunicaciones entre microcontroladores y sensor inercial IMU

Los encoders empleados son encoders de cuadratura, por lo cual se requiere dos pines del microcontrolador para manejarlos. Uno de los pines debe ser configurado como interrupción externa y el otro simplemente es una entrada digital. Cada 0.2 grados de giro de la llanta, se producirá una interrupción externa; el pin adicional de entrada digital permite determinar si se debe sumar o restar este valor a la variable que contabiliza la posición de la llanta.

El encoder debe ser alimentado con 5V, cada encoder entrega dos señales de salida: CS1 (Control Signal 1 o señal de control 1) y CS2 (Control Signal 2 o señal de control 2) (Figura 2.33). No importa cómo se conecte estas señales al microcontrolador, lo importante es que una de ellas se conecte a la interrupción externa y la otra a un pin de entrada digital (Figura 2.34).

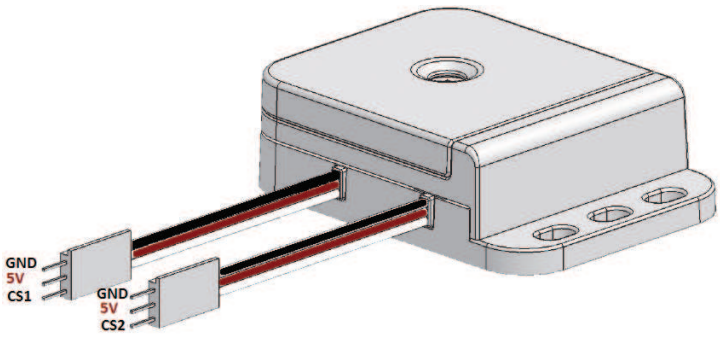


Figura 2.33: Pines del encoder

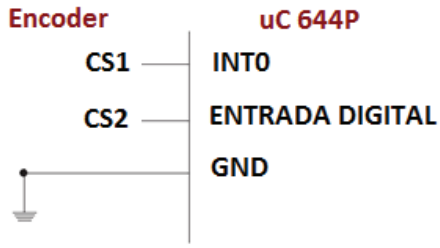


Figura 2.34: Conexión entre encoder y microcontrolador

Mediante un encoder, colocado a cada motor es posible medir la velocidad angular de cada motor, y por consiguiente determinar la velocidad lineal del vehículo.

Mediante un pin del microcontrolador Atmega8 y Atmega644P se realiza la medición del voltaje de la batería. Esta medición tiene como propósito medir el voltaje actual de las baterías mediante un conversor analógico digital y determinar si están en condiciones de seguir funcionando.

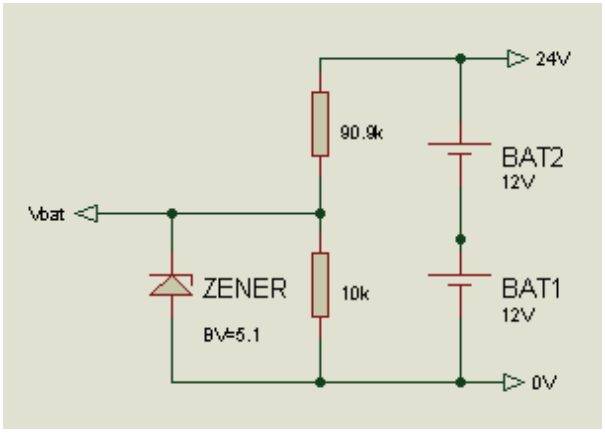


Figura 2.35: Medición del voltaje actual de las baterías

En la Figura 2.35 se puede observar el circuito para medición del voltaje de las baterías. El divisor de voltaje es interno al controlador de potencia, el cual a través del pin 3 de su conector, entrega esta señal al microcontrolador. El zéner de 5.1V es un zéner de señal, que se coloca en la placa como protección del pin del microcontrolador. La señal del voltaje de batería (Vbat) se conecta al pin para la conversión analógica-digital.

La comunicación paralela entre el microcontrolador Atmega644P y el microcontrolador Atmega8 se realiza empleando las resistencias internas de pull-up del microcontrolador Atmega644P. La distancia entre los pines es menor a 1cm (Figura 2.36).

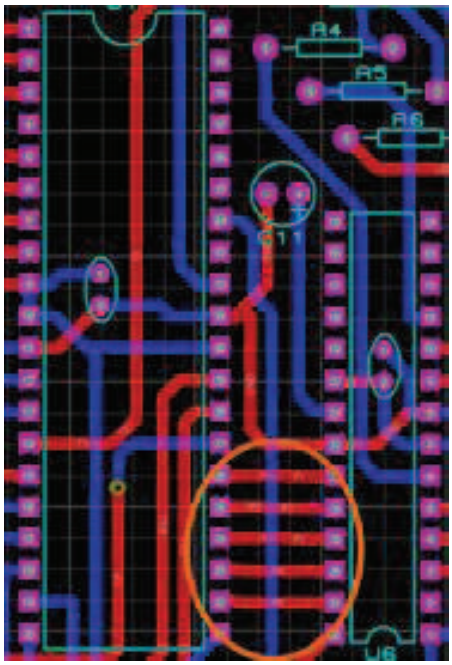


Figura 2.36: Comunicación paralela entre Atmega8 y Atmega644P

El microcontrolador Atmega8 recibe las señales de los pulsadores, que cuando se presionan indican que el conductor desea girar o acelerar (Figura 2.37). Cuando se presiona un solo pulsador se gira para el lado correspondiente, mientras que cuando se presionan ambos pulsadores, el vehículo acelera.

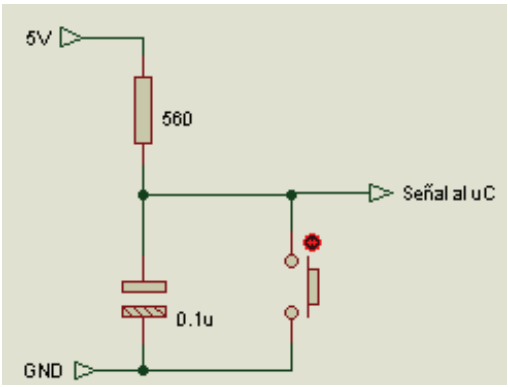


Figura 2.37: Pulsador para giro o aceleración del vehículo

La comunicación entre la IMU y un PC se la puede realizar directamente sin sacar el sensor de la placa, ya que se ha previsto un canal de comunicaciones RS-232 para recibir y enviar información (Figura 2.38).

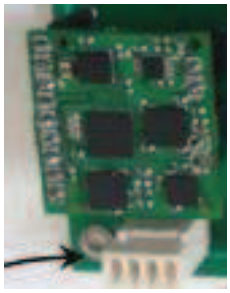


Figura 2.38: Comunicación entre sensor inercial y PC

Se usó el software PROTEUS V7.7 para construir la placa. Colocando en la misma conectores Sil tipo bus de datos, con el objetivo de brindar versatilidad para conectar y desconectar los dispositivos relacionados a ésta.

Controladores de potencia y motores

Los controladores de potencia (puentes H) serán ubicados junto a los motores y permiten su control mediante señales PWM, que permiten modular el voltaje aplicado al motor y su sentido de giro de acuerdo a las señales entregadas (Tabla 2.10).

Como se ve en la Tabla 2.10, el control se realiza por medio de dos señales. Una de ellas es un PWM y la otra es un cero lógico. El PWM indica la cantidad de voltaje a aplicar al motor, mientras que el sentido de giro lo determina que señal se aplica a las señales ALI y BLI.

Para lograr realizar esta inversión con un canal PWM y un pin digital del microcontrolador se utiliza la configuración de la Figura 2.39.

AHÍ	BHI	ALI	BLI	Disable	Función
1	1	0	PWM	0	Avanzar
1	1	PWM	0	0	Retroceder
1	1	0	0	0	Frenar
X	X	X	X	1	Deshabilitar
X= no importa que valor **0= 0 Voltios** **1= 5 Voltios** **PWM= Señal de ancho de pulso modulado** **Nota: Se recomienda que el PWM trabaje con una frecuencia menor a 16Khz**					

Tabla 2.10: Señales de control al controlador OSMC de motores, tomado de [35].

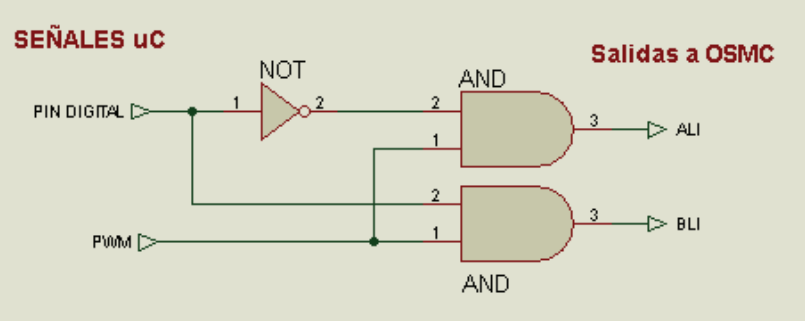


Figura 2.39: Circuito para control de señales del controlador OSMC

En cuanto a la elección de los motores se optó por motores de DC por la facilidad de controlarlos. Se seleccionó el kit motor – adaptador – llanta de NPC Robotics debido a las facilidades que brinda para el montaje. Los motores se ajustan a la estructura con tornillos acoplados a unas plataformas de sujeción. Para la sujeción de dichas plataformas a la base del vehículo se emplean tornillos y suelda, debido a que estas piezas van a soportar todo el peso del vehículo, además de la vibración entre la estructura y los motores debida al terreno.

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL

3.1 CONDICIONES DE SOFTWARE

El programa base sobre el cual se desarrollará el software de control debe tener librerías eficientes que optimicen instrucciones y funciones, puesto que, el tiempo de ejecución de las tareas debe ser mínimo, si se quiere realizar un control determinístico del sistema. Además se vio la necesidad de simplificar el trabajo para no perder el tiempo en subrutinas básicas como configuración de LCD, retardos, entre otras funciones.

Los requerimientos necesarios de software son exigentes para una tarea en donde la tasa de actualización de la señal de control es alta y el algoritmo de control debe ejecutar numerosas operaciones, ya que de esto depende la estabilidad del vehículo y que el usuario no tienda a caerse.

Se busca un software con el que se tenga compatibilidad con los programadores conocidos y que la gama de microcontroladores que sea capaz de programar sea grande, incluyendo Tiny, Atmega y Xmega de ATMEL.

Se necesita un programa en el cual se ocupen instrucciones familiares, estudiadas de antemano, para no entrar en investigaciones largas de un nuevo software que impliquen mayores tiempos de desarrollo: que use una interfaz amigable con el usuario; que el lenguaje de programación sea C, igual de eficiente que el lenguaje ensamblador y mejor que el BASIC; que por último se adapte a los micro controladores ATMEL que son fáciles de adquirir localmente y al alcance financiero.

3.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL SELECCIONADO: CODEVISION AVR

CodeVision utiliza el lenguaje C, diseñado para la familia de controladores Atmel AVR, e integra un generador automático de código. Es compatible con los sistemas operativos Windows 2000, XP, VISTA, 7 en 32 y 64 bits. Algunas de las librerías que posee se presentan a continuación [36]:

- LCD
- Rutinas de retardos
- I2C
- Sensor de Temperatura LM75
- Reloj en tiempo Real DS1302 y DS1307
- Comunicación SPI
- Administrador de Energía
- Accesos a tarjetas de memorias MMC/SD/SD HC FLASH

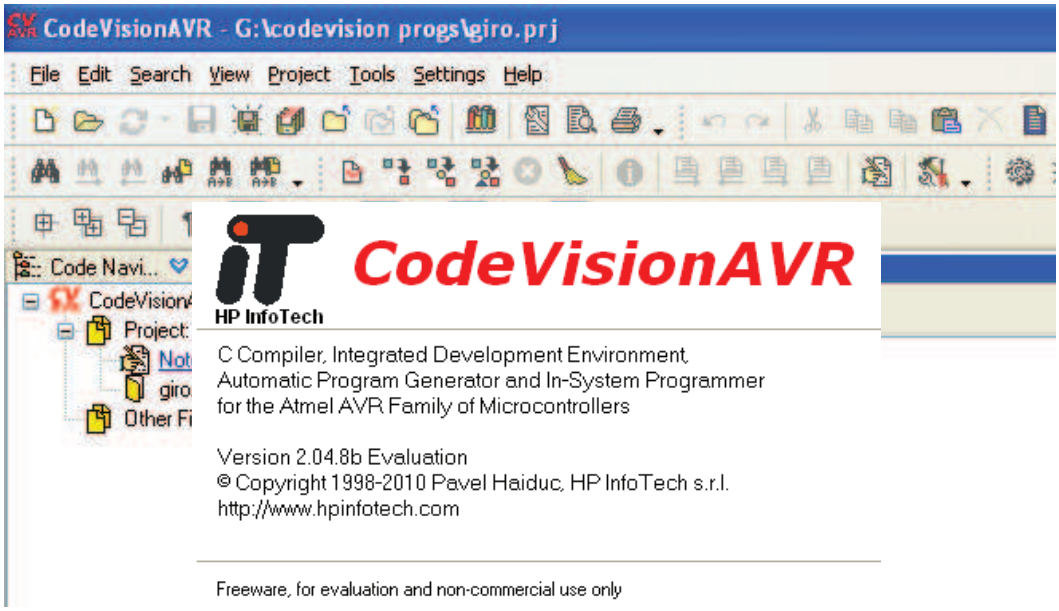


Figura 3.1: Software CodeVisionAVR

El generador automático de programa permite [36]:

- Configurar accesos de memoria externa
- Inicializar pórticos como entrada o salida
- Inicializar interrupciones externas
- Inicializar temporizadores y contadores
- Inicializar temporizador perro guardián
- Configurar el puerto serial UART
- Configurar el comparador análogo
- Configurar el ADC
- Inicializar la interfaz SPI
- Bus I2C, Sensor de temperatura LM75
- Inicializar el módulo LCD
- Inicializar relojes de tiempo real como el DS1307

El CodeWizardAVR (Figura 3.2) como también es llamado el generador de código automático, simplifica el trabajo del programador mostrando el código de las configuraciones más usadas como interrupciones, timers, comunicación, pórticos, etc.

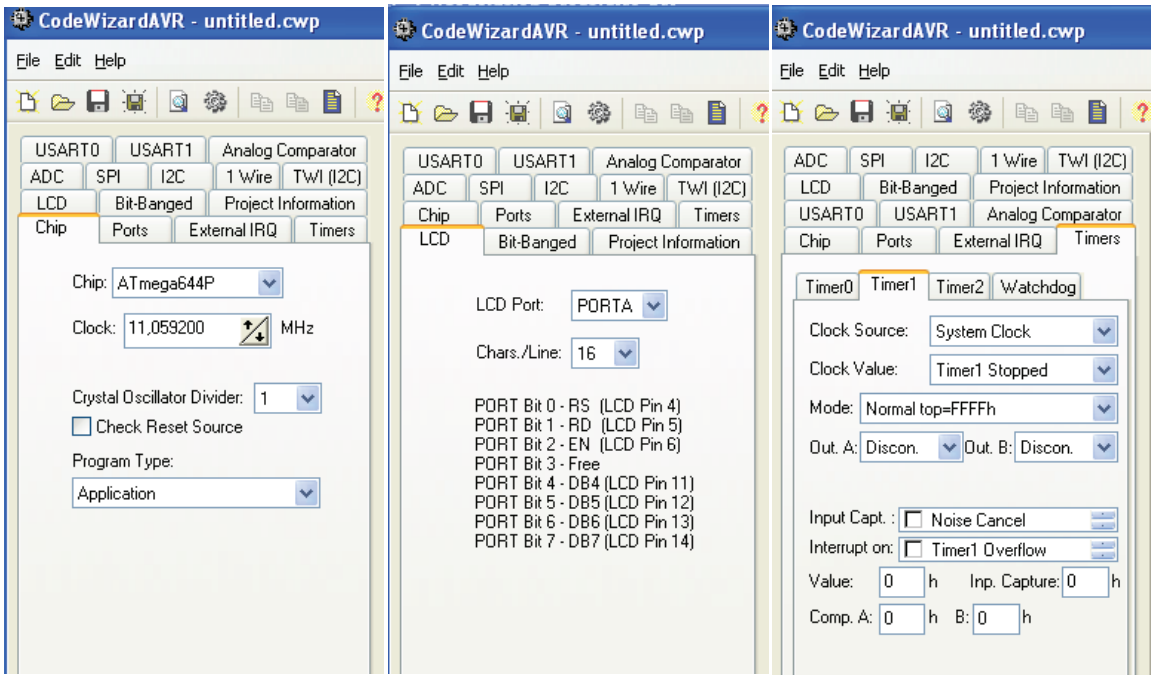


Figura3.2: CodeWizarAVR de CodeVisionAVR

3.3 PROGRAMADOR: AVR DRAGON

Es el programador usado para programar los microcontroladores, cuenta con todos los diferentes modos de programación de la familia ATMEL, incluyendo un soporte completo de emulación para dispositivos con memoria FLASH de 32kB o menores [37].

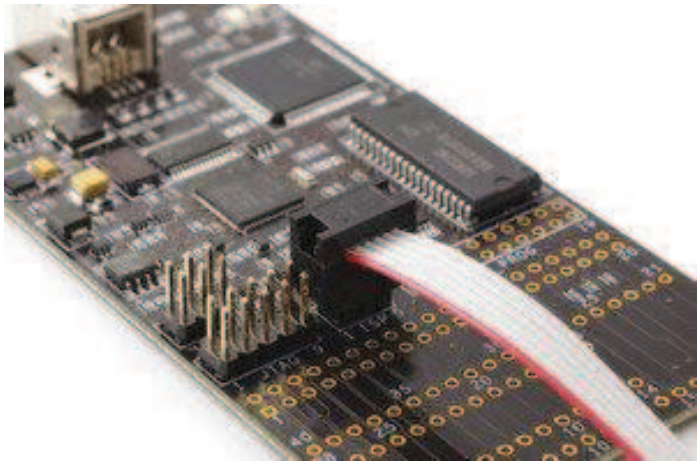


Figura 3.3: Programador AVRDragon

3.3.1 INTERFACES DE PROGRAMACIÓN

- Programación en sistema (ISP por sus siglas en inglés).
- Programación serial en alto voltaje (HVSP por sus siglas en inglés).
- Programación en paralelo (PP por sus siglas en inglés).
- Programación JTAG

3.3.2 INTERFACES DE EMULACIÓN

- JTAG
- debugWIRE (dw)

La programación ISP fue escogida para la programación de los microcontroladores, por ser familiar y estándar. El software que permitió el uso

efectivo de AVR DRAGON es el AVR STUDIO 4.0, que es ofrecido de forma gratuita por ATMEL y que permite actualizar el programador y realiza las funciones básicas de programación.

El manejo de un nuevo dispositivo como éste, garantiza que el microcontrolador pueda ser desbloqueado, en caso de que suceda, por una errónea programación de sus fusibles.

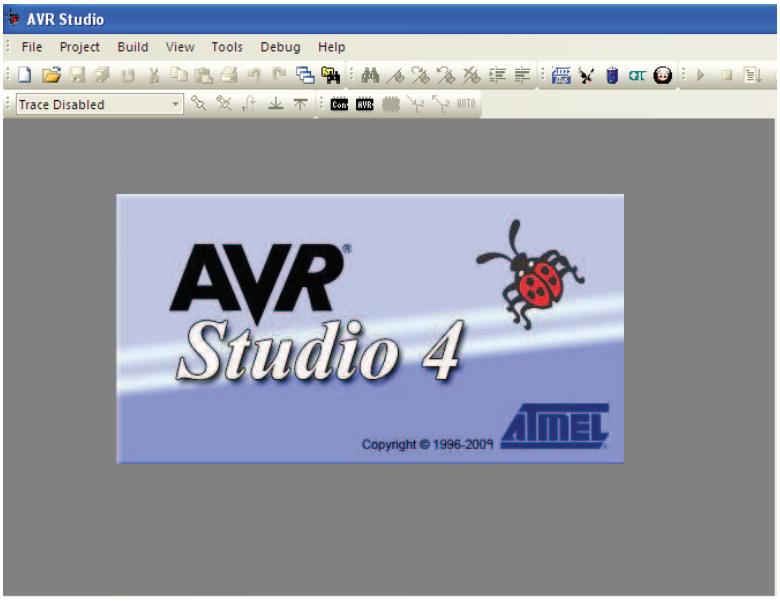


Figura 3.4: AVR Studio versión 4.0

3.4 COMUNICACIÓN Y CONEXIÓN CON EL SENSOR DE INCLINACION IMU

3.4.1 CONFIGURACIÓN INICIAL DEL SENSOR IMU POR MEDIO DE LA COMPUTADORA

La interfaz con el computador es por medio de comunicación RS-232 y para ello se usa el MAX232 el cual se encarga de convertir los niveles de tensión TTL del Atmega (0V y 5V) en niveles RS-232 compatibles (+10V y -10V), necesario para

poder comunicarse con la computadora, en la Figura 3.5, se presenta el diagrama de conexión.

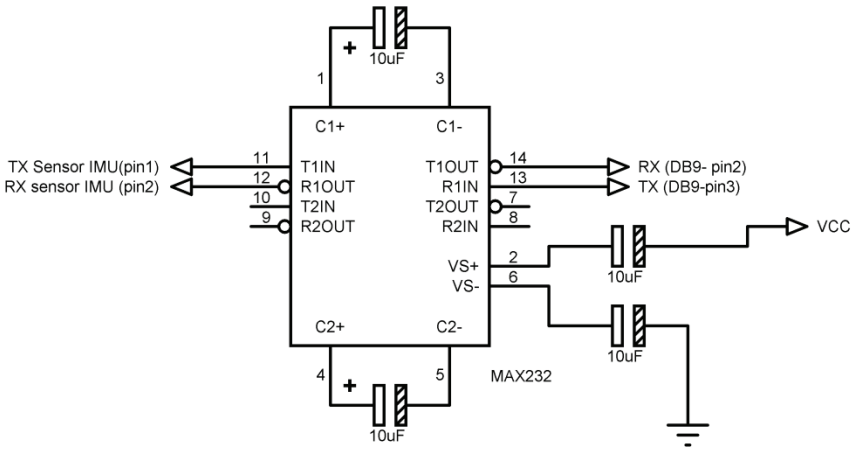


Figura 3.5: Diagrama comunicación RS-232 con MAX232

Una vez conectado el sensor al computador se ingresa al programa AHRS INTERFACE (el cual se obtiene en la página del proveedor [38]), cuya interfaz permite configurar al sensor. Para ingresar se realizan los siguientes pasos:

- Se escoge el puerto donde está conectado el sensor, se escribe la velocidad de comunicación (115200 baudios) y se da un clic en el ícono en forma de visto, para empezar el enlace, (Figura 3.6).

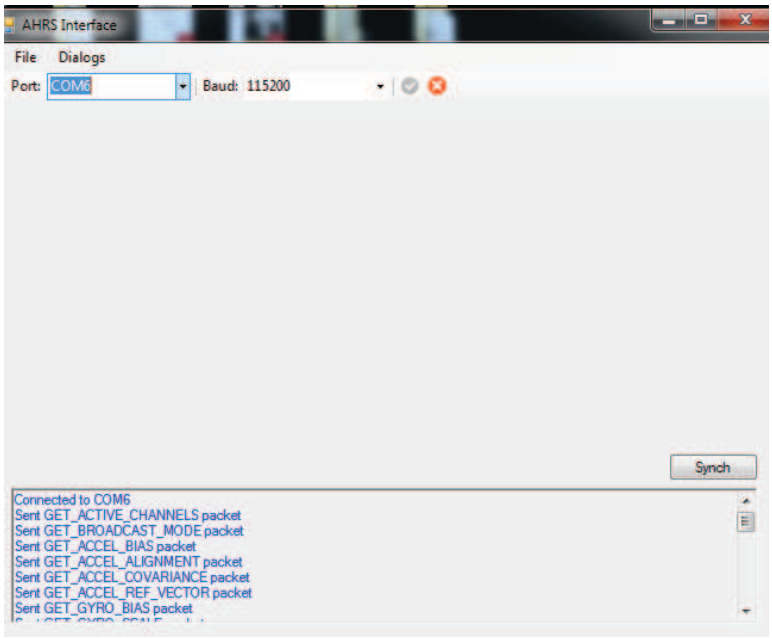


Figura 3.6: Ventana de inicio de la Interfaz AHRS

- Los mensajes color verde en la parte inferior indican que se ha conectado (Figura 3.7), caso contrario estos tendrán color rojo debido posiblemente a alguna mala conexión, puerto equivocado o mal funcionamiento del sensor.

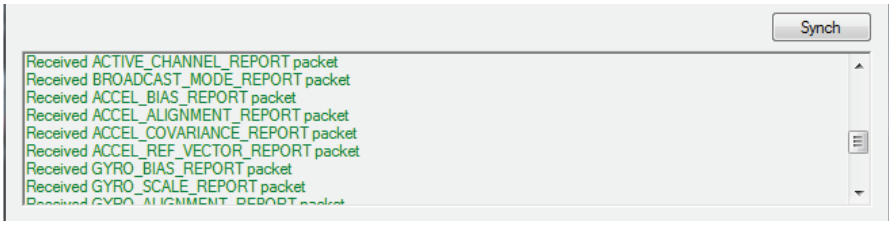


Figura 3.7: Mensajes de correcta conexión

- Se da un clic en la barra de herramientas en DIALOGS y luego en CONFIG; a continuación se abre una ventana dinámica en tiempo real del sensor, donde se muestra gráficas de los comportamientos actuales de las variables y donde se puede observar los cambios que tienen al movimiento físico del sensor, como se ve en la Figura 3.8.

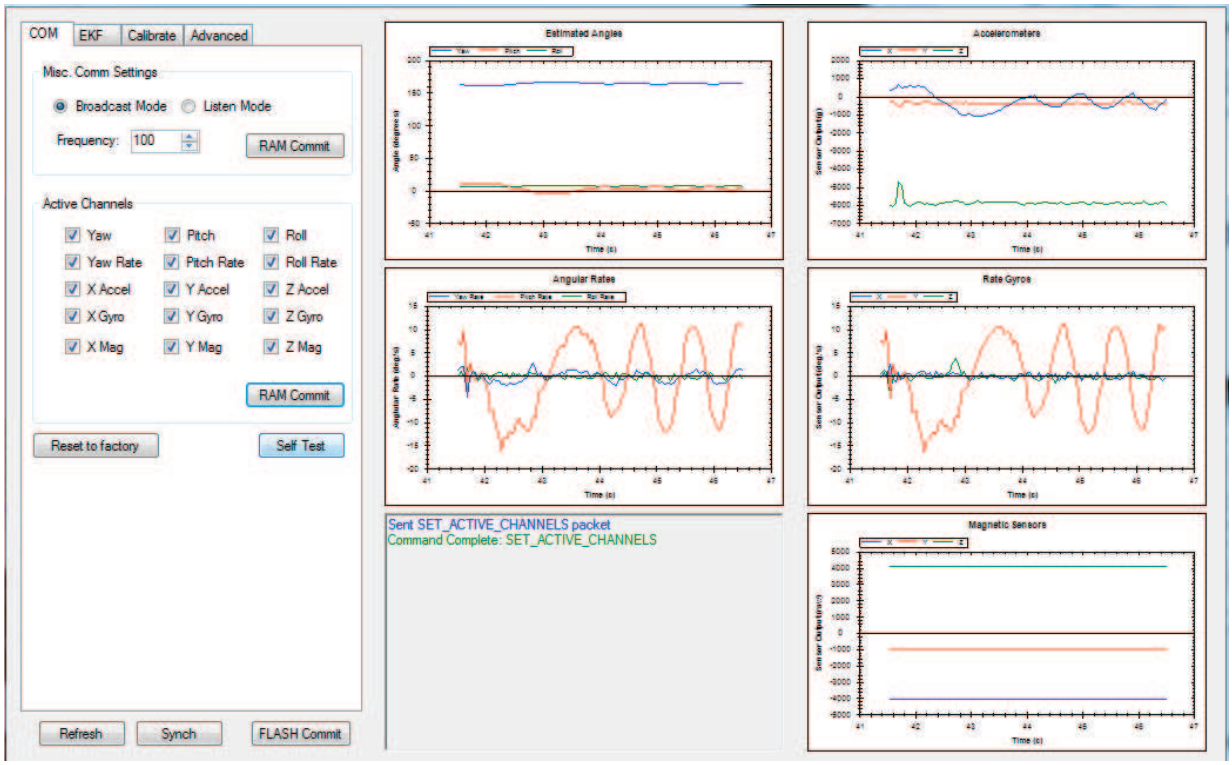


Figura 3.8: Ventana principal de configuración del sensor

- El sensor IMU tiene dos modos de enviar los datos, el primero llamado modo BROADCAST, envía datos continuamente con una frecuencia regulable de 20Hz a 300Hz, y el segundo llamado modo SILENT donde envía datos, siempre y cuando se haya realizado la petición.

- En las diferentes pestañas se pueden calibrar los magnetómetros, calibrar los giroscopios, los acelerómetros, ajustar el Filtro Kalman y escoger que variables se transmiten.

  Para el interés de este proyecto se transmiten las variables de alabeo (ángulo) y tasa de variación del alabeo (velocidad angular). Cuyos rangos se encuentran de 90 a -90 grados y desde 300 a -300 grados/segundo respectivamente [39].

  Se escogen estas variables porque el control de estabilización se realiza en un solo eje. Además se trabaja con el modo SILENT para recibir un paquete de datos únicamente cuando se lo desea.

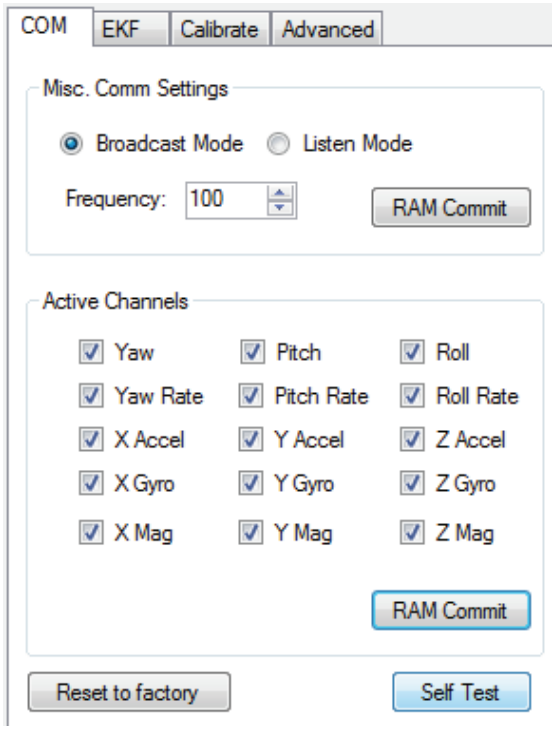


Figura 3.9: Configuraciones básicas del sensor IMU

3.4.2 CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA Y MANUAL DEL SENSOR DE INCLINACIÓN

En primer lugar para lograr obtener los mejores valores de calibración se coloca al sensor en el lugar donde trabajará definitivamente. El motivo principal de esto son los magnetómetros internos del sensor, los cuales son afectados por el material con el que se encuentra construida la estructura metálica del vehículo, este material en parte es de hierro el cual tiene características magnéticas que alteran las referencias del sensor.

Una vez ubicado el sensor se procede a calibrar. Si se calibra manualmente se deben asignar los pesos que están en la matriz de estimación, los cuales son ajustados de acuerdo a las condiciones de la aplicación, tomando siempre como referencia las gráficas.

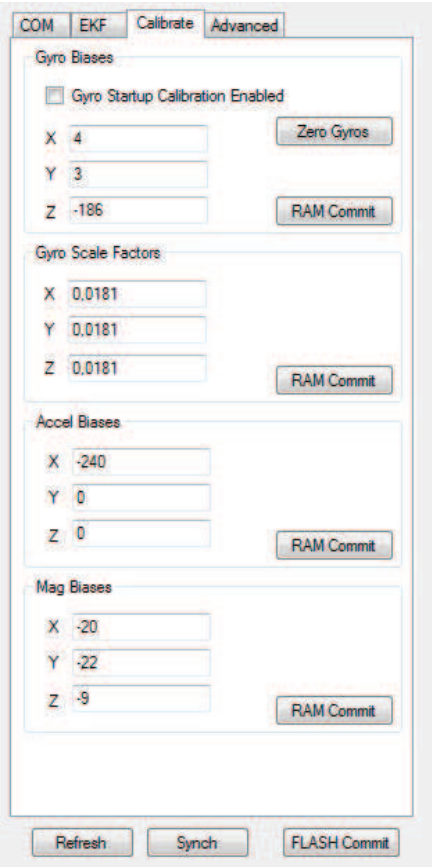


Figura 3.10: Calibración fina de Offset en las estimaciones de ángulos.

En la Figura 3.11 se asigna mediante la varianza del acelerómetro, la varianza del magnetómetro y la varianza del proceso la importancia de cada medida en la estimación correcta del ángulo.

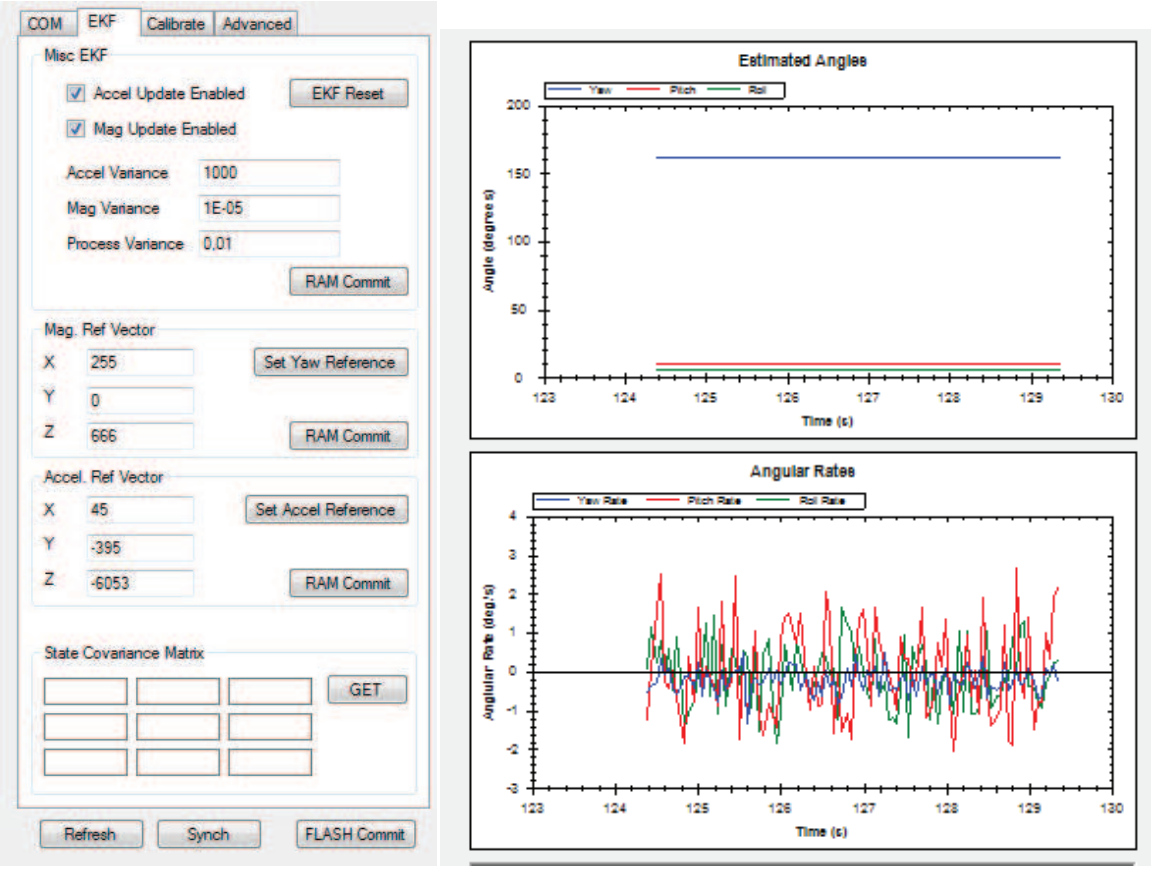


Figura 3.11: Calibración del Filtro de Kalman Extendido

En la ventana de configuración mostrada en la Figura 3.10 se encera los giroscopios. Además, de ser necesario se setea el offset de los ángulos para calibrarlos de acuerdo a la necesidad de la aplicación.

Si se calibra automáticamente, se ubica primero en la barra de herramientas de la ventana mostrada en la Figura 3.6 y se abre DIALOGS / MAGNETOMETER CALIBRATION. Se despliega la ventana mostrada en la Figura 3.12.

Una vez abierta la ventana, se da clic sobre START DATA COLLECTION. Después de haber pulsado, se procede a mover el sensor en todas direcciones,

es posible darse cuenta que existe una barra de estado donde se muestra el estado del proceso. Una vez terminado, en la parte inferior de la ventana se llenará la matriz con los valores obtenidos automáticamente por el sensor. Si estos no llegan a ser los mejores se puede volver a repetir el proceso hasta alcanzar lo requerido.

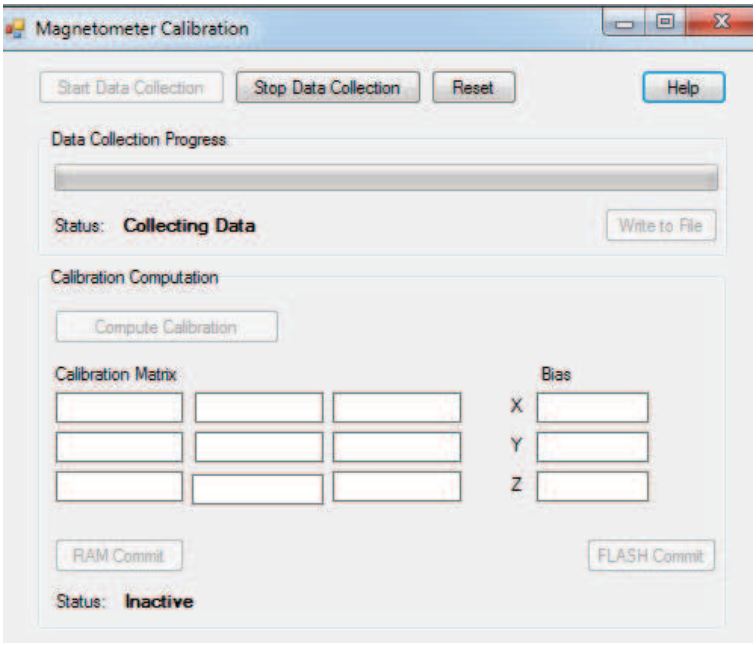


Figura 3.12: Ventana de calibración de magnetómetros

3.4.3 TRAMA DE DATOS

La estructura de la trama, en la Tabla 3.1, es exactamente igual tanto en recepción como en transmisión.

Función	"s"	"n"	"p"	Pt	N	D1	……	DN	CHK	
Byte	1	2	3	4	5	6	…..	N+5	N+6	N+7

"snp"	Cada paquete recibido debe empezar con 3 bytes (caracteres) secuenciales para señalar el comienzo de un nuevo paquete.
Pt	Especifica el tipo de paquete que se envía.
N	Especifica el número de bytes de datos que espera recibir.
D	D1 a DN contiene los N Bytes de datos en el paquete.
CHK	Son dos bytes que contienen la suma de los anteriores, chequea si el paquete es correcto.

Tabla 3.1: Estructura de la trama de comunicación

El resultado de la suma de los bytes de la trama en hexadecimal es el contenido de los 2 bytes últimos CHK.

Para visualizar mejor las tramas se usó un programa computacional llamado BRAY [40] (Figura 3.13), similar al conocido HYPERTERMINAL de las computadoras. Pero éste cuenta con herramientas que ayudan a visualizar tramas como las que se presentan en este proyecto: se puede borrar la pantalla sin la necesidad de una nueva conexión, se puede mostrar los datos en hexadecimal o como caracteres, contar los datos, separar los bytes, etc. En resumen facilita el análisis de una trama de comunicación serial.

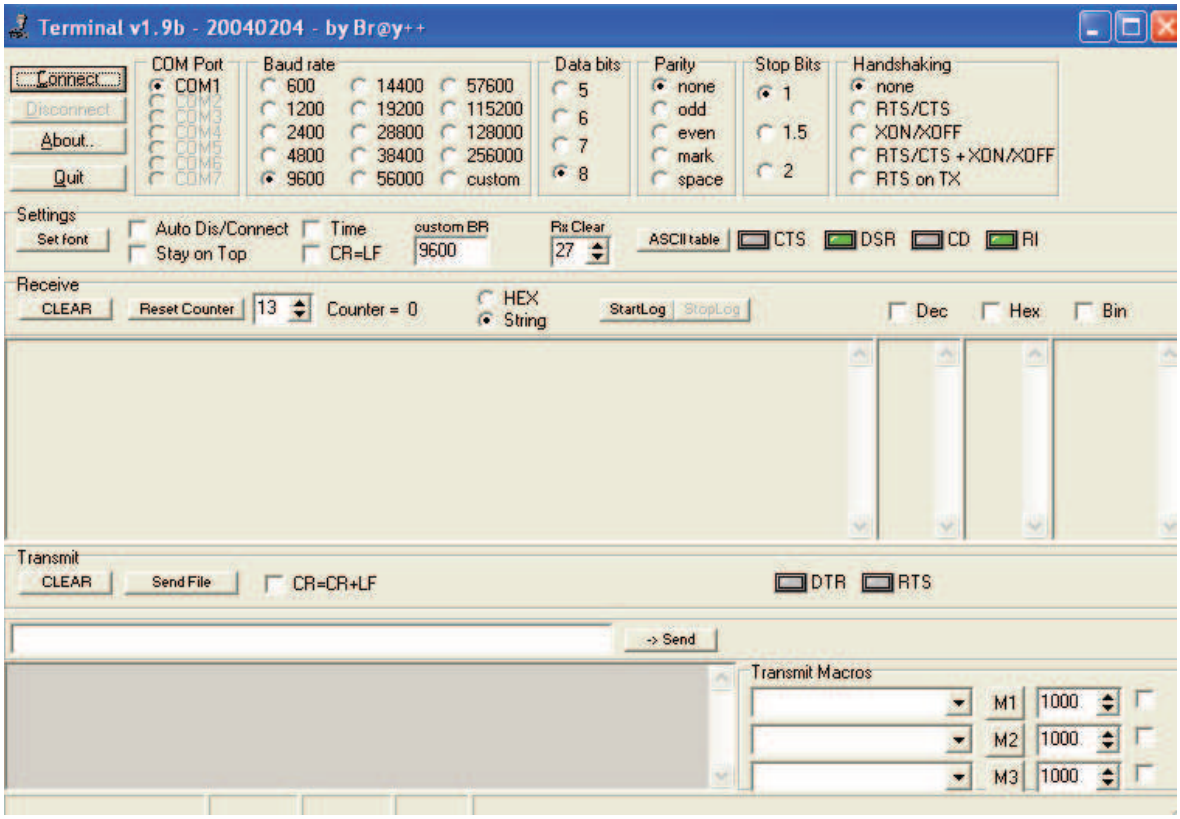


Figura 3.13: Software BRAY

Además permite conectarse y desconectarse, contar bytes en recepción y transmisión, encontrar secuencias hexadecimales y contar caracteres

3.4.4 COMUNICACIÓN SERIAL CON LOS MICROPROCESADORES

El sensor de inclinación es muy importante en el sistema de balance, como se ha visto por las diferentes funciones y aplicaciones en el presente proyecto.

El manual del usuario del sensor CHR-6dm AHRS muestra las características que debe tener la comunicación serial [39].

- Velocidad de comunicación: 115200 baudios
- 8 bits de datos
- 1 bit de parada
- No paridad

Para obtener los datos del sensor se debe enviar una trama que representa la petición del dato útil llamada GETDATA [39] (Tabla 3.2). El envió de la trama de petición lo hace el microcontrolador Atmega8 con una frecuencia de 100Hz, Una vez que la trama fue recibida por el sensor, éste enviará la trama con los datos útiles de inclinación (ángulo y la velocidad angular).

Función	**“s”**	**“n”**	**“p”**	**Pt**	**N**	**CHK**	
Byte	1	2	3	4	5	6	7
	“s”=73h	“n”=6Eh	“p”=70h	0x01h	0x00h	=152h	

Tabla 3.2: Petición de dato al sensor GET_DATA

El atmega644P se encarga de recibir la trama de los datos de inclinación, en caso de que sucediera algún error en la comunicación, el sensor enviará el paquete de datos llamado BAD_CHECKSUM o UNRECOGNIZED_PACKET [39], estas tramas son enviadas respectivamente por una incoherencia con los bytes de CHK o cuando no se reconoció el tipo de dato (Tabla 3.3 literales a y b).

La trama correctamente transmitida hacia el atmega644P tendrá 6 bytes de información, 4 de los cuales son datos que se encuentran como enteros de 16 bits con complemento a 2, por lo tanto por cada variable que se quiera transmitir se

tendrán 2 bytes más. En este caso son 2 variables, ángulo y velocidad angular. Se puede ver la trama en la Tabla 3.4.

Función	**“s”**	**“n”**	**“p”**	**Pt**	**N**	**CHK**	
Byte	1	2	3	4	5	6	7
	“s”	“n”	“p”	0xB2h	0x00h	203h	

Tabla 3.3: a) BAD_ CHECKSUM

Función	**“s”**	**“n”**	**“p”**	**Pt**	**N**	**D1**	**CHK**	
Byte	1	2	3	4	5	6	7	8
	“s”	“n”	“p”	0XB4h	0x01h	TP		

Tabla 3.3: b) UNRECOGNIZED_PACKET

“snp”	**Pt**	**N**	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**D6**	**CHK**
	0XB7h	0x06h	0x48h		Pitch		Pitch rate		
D1 y D2	Indican que variables se envían								
D3 y D4	Pitch (ángulo) en complemento 2 entero								
D5 y D6	Pitch rate (velocidad angular) en complemento 2 entero								

Tabla 3.4: Trama de datos

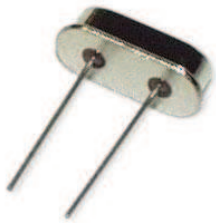


Figura 3.14: Cristal 11059200 Hz

Para la comunicación de 115200 baudios se seleccionó el cristal de 11,0592MHz conectado a los microcontroladores con la finalidad de tener teóricamente 0% de error en la comunicación.

3.5 DIAGRAMAS DE FLUJO

3.5.1 ATMEGA644P

El microcontrolador Atmega644P es el microcontrolador principal de la aplicación. Este microcontrolador se encuentra en estado de espera, hasta recibir por comunicación serial, el paquete enviado por la IMU. Una vez recibido, analiza si el paquete tiene errores, para ello suma todos los bytes del paquete, excepto CHK1 y CHK2 y compara este valor con el Checksum. Si los valores son iguales, la trama transmitida es correcta.

Si la trama, contenida en el paquete de datos, no es correcta, se espera hasta recibir un nuevo paquete. Si por el contrario, la trama es correcta, se extrae de ella los datos de interés, que son inclinación y velocidad de inclinación.

Con estos datos, el microcontrolador calcula la integral del error del ángulo y el valor de la señal de control, evaluando su algoritmo PID. Esto permite obtener el primer componente del PWM, que se aplicará a los motores.

El microcontrolador calcula la velocidad lineal del vehículo, en función de las mediciones obtenidas de los encoders.

Mediante comunicación paralela, el microcontrolador Atmega644P se comunica con el microcontrolador Atmega8, el cual envía los datos de giro o aceleración deseada. Con estos datos, el microcontrolador Atmega644P, es capaz de calcular el valor de PWM debido a aceleración y giro.

Se suman todos los componentes de PWM, y se obtiene el PWM final, que será aplicado a los motores.

Una vez realizado esto, el microcontrolador vuelve a modo de espera, hasta recibir un nuevo paquete de datos del sensor de medición inercial IMU.

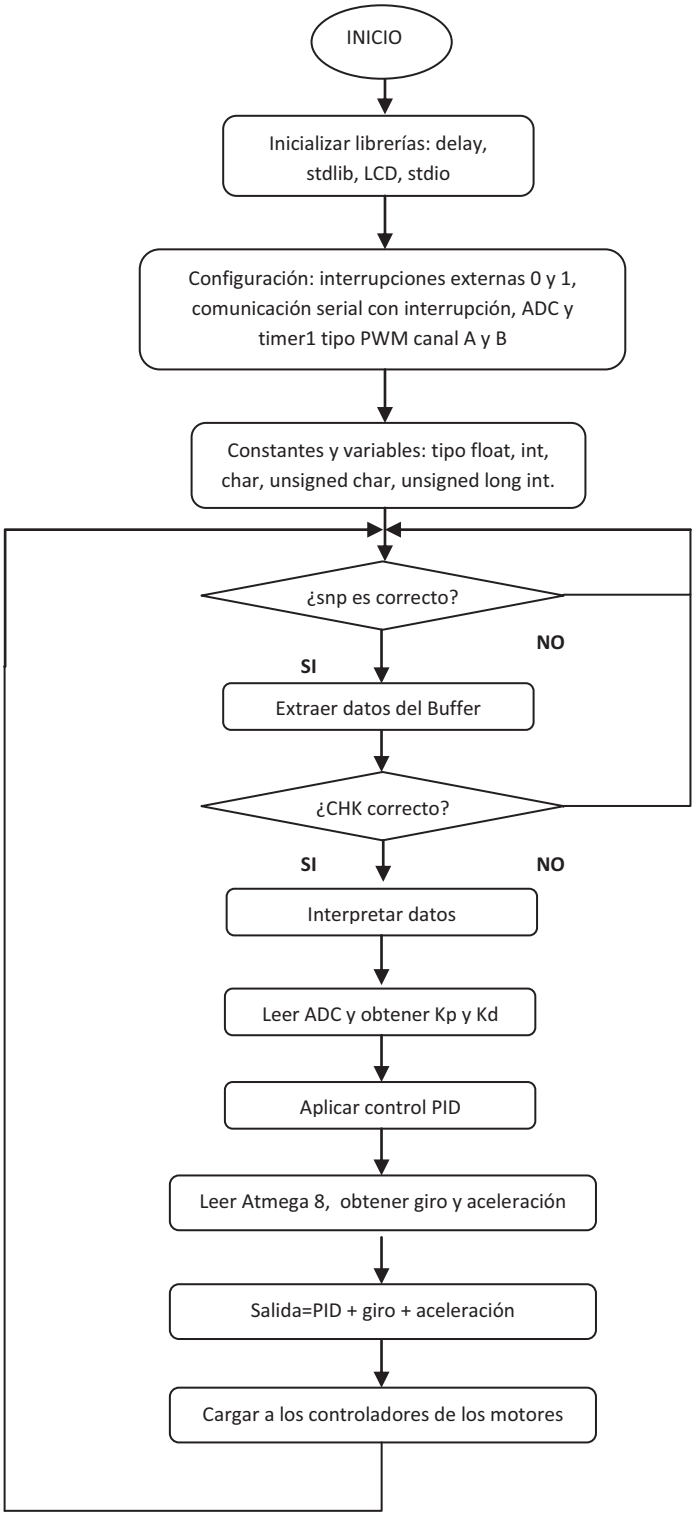


Figura 3.15: Diagrama de flujo rutina de control del microcontrolador Atmega644P

Subrutina de recepción de datos

El programa cuenta con un buffer de 13 bytes para recepción de la trama completa, la misma que se realiza por medio de interrupción. Los datos recibidos

por comunicación serial son almacenados en un arreglo de variables del tipo CHAR. El algoritmo verifica que las banderas de error en la trama, error de paridad y desbordamiento se encuentren apagadas para recibir cada byte de datos como un byte válido. El programa se encuentra en espera mientras no se reciba ningún dato.

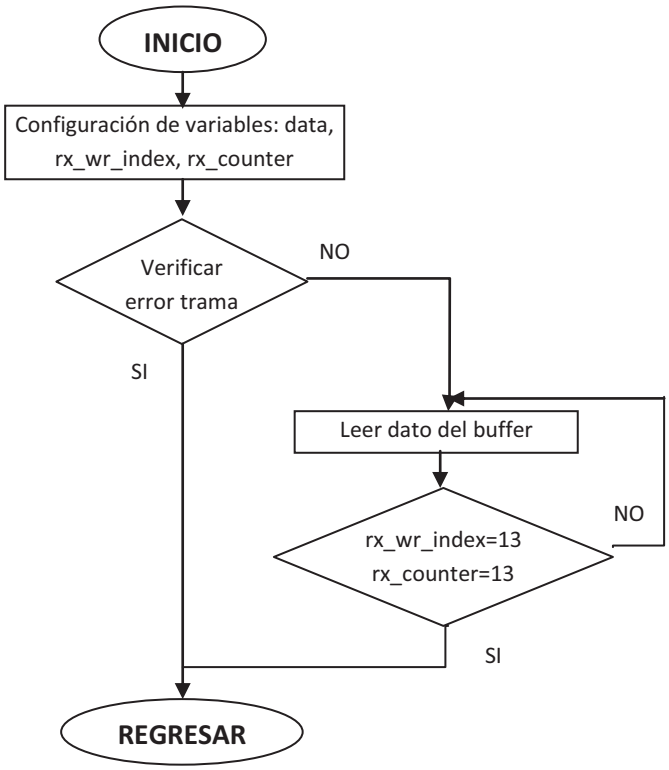


Figura 3.16: Diagrama de flujo subrutina de recepción de datos

Subrutina de búsqueda de Trama

El programa toma el primer byte del buffer y lo compara con la letra “s”. Si la comparación no es exitosa, se descarta este byte y se toma el siguiente byte del buffer y se repite la comparación hasta encontrar la letra “s”. Una vez encontrada la letra “s”, se toma el siguiente byte del buffer y se lo compara con la letra “n”. Si el byte no contiene la letra “n”, se vuelve al inicio de esta subrutina; es decir, se analiza si este byte es la letra “s”. Pero si el byte contiene la letra “n”, se toma el siguiente byte y se evalúa para ver si contiene la letra “p”. Con este byte se toma la misma acción que para el byte anterior, que contiene la letra “n”.

Una vez verificado que la trama contiene las letras “snp”, se toman los siguientes 10 bytes del buffer. Se comparan los bytes PT (Tipo de paquete o Packet Type por sus siglas en inglés), N (Número de bytes de datos), y los dos primeros bytes de datos con los valores conocidos y esperados de PT, N y los dos primeros bytes de datos. Si existe concordancia en la comparación, se procede a analizar si el Checksum de la trama es correcto, para poder tomar los datos de ángulo y velocidad angular como datos válidos

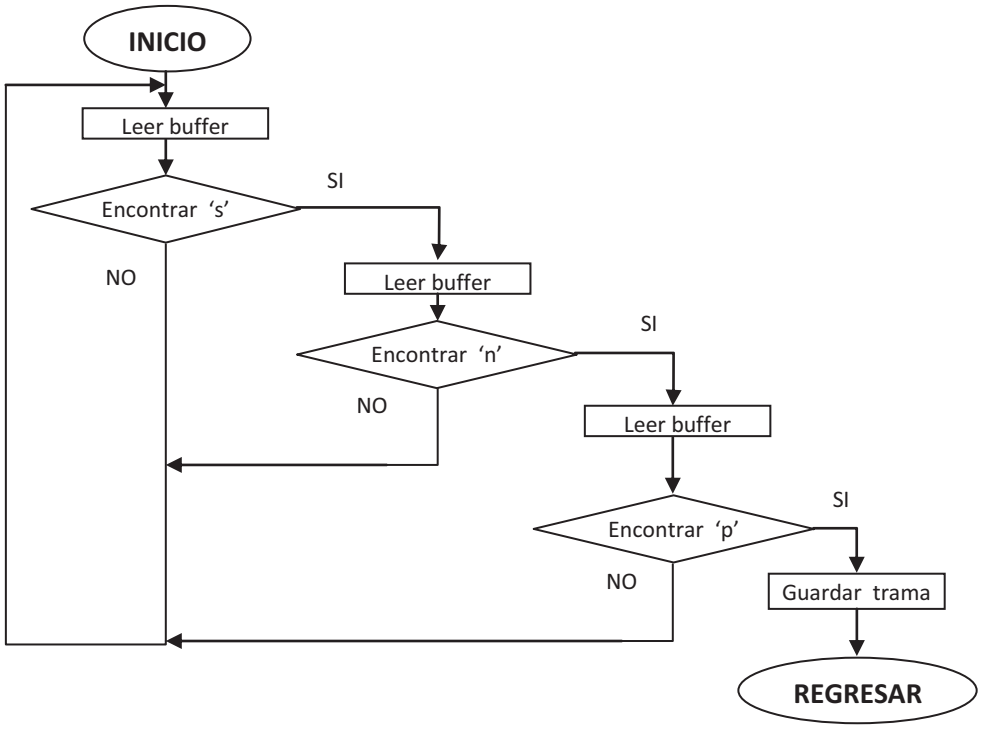


Figura 3.17: Diagrama de flujo subrutina de búsqueda de trama

Subrutina de validación de Trama

Esta subrutina es la encargada de calcular el Checksum de la trama recibida y compararlo con el Checksum que contiene la trama. Para calcular el Checksum de la trama, el algoritmo debe sumar los once primeros bytes de la trama de 13 bytes. El resultado será un número entero, es decir, se compone de dos bytes. Para calcular el Checksum enviado en la trama, se toma el último byte de la trama y se le suma la multiplicación del penúltimo byte de la trama por 256. Se comparan estos dos resultados. De ser iguales, se procederá a la subrutina de

obtención de ángulo y velocidad angular, de lo contrario se descartan los datos recibidos.

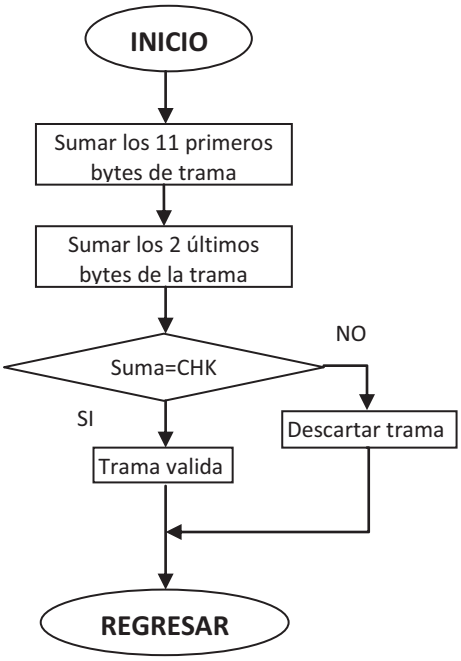


Figura 3.18: Diagrama de flujo subrutina de validación de trama

Subrutina de obtención de Ángulo y velocidad angular

Esta subrutina extrae los datos de ángulo y velocidad angular de la trama. Los datos son recibidos como enteros con complemento a 2. Esto nos permite conocer si el signo del dato es positivo o es negativo y cuál es el valor de la medición. El dato de ángulo está contenido en los bytes 8 y 9, mientras que el dato de velocidad angular está contenido en los bytes 10 y 11, siendo los bytes 8 y 10 los más significativos del entero.

En primer lugar es necesario examinar el valor del bit más significativo del entero. Por ejemplo: si el bit más significativo del byte 8 es cero, esto quiere decir que el signo del valor del ángulo es positivo. Si por el contrario este bit fuese igual a 1, esto indicaría que el signo del valor del ángulo de inclinación es negativo. De este modo es posible conocer el signo del ángulo de inclinación.

Para conocer el valor de dicho ángulo de inclinación, se procede de la siguiente manera: En primer lugar se calcula el valor entero que representan los dos bytes de cada dato. Es decir, se multiplica el byte más significativo por 256 y al resultado se le suma el byte menos significativo.

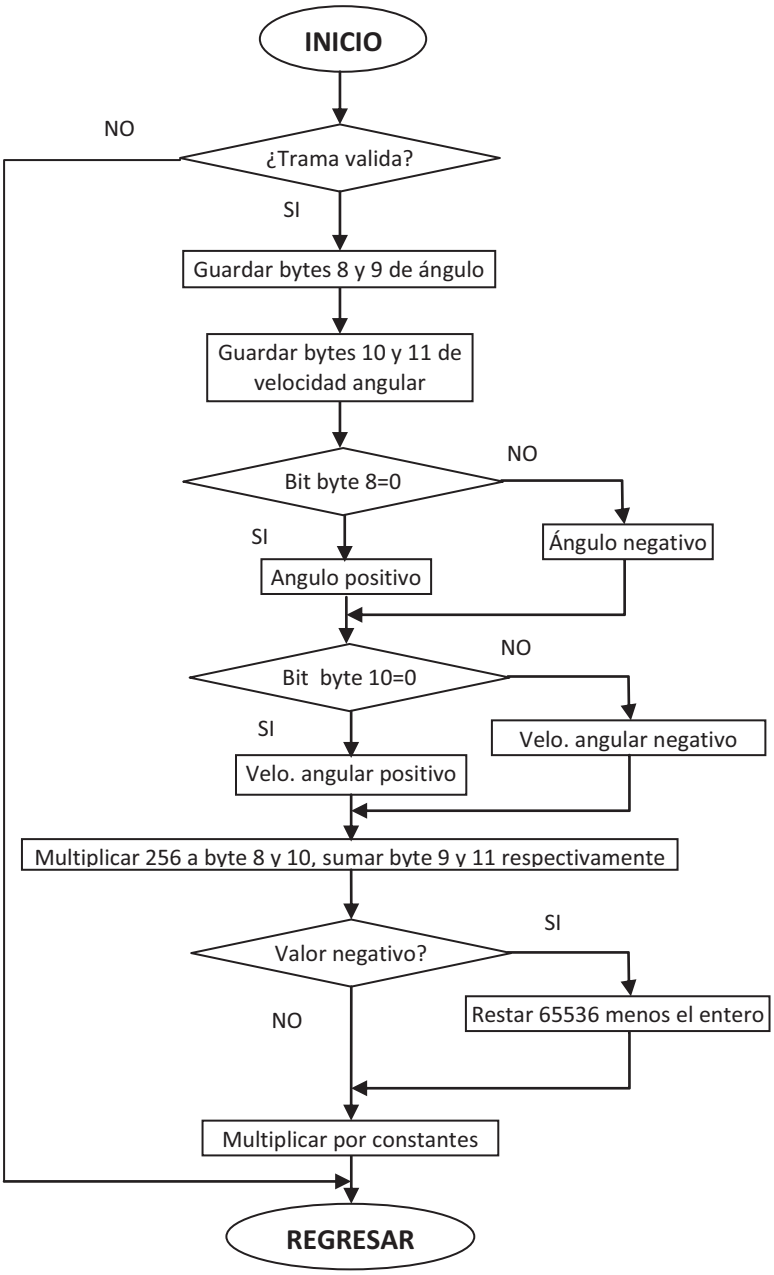


Figura 3.19: Diagrama de flujo subrutina de obtención de ángulo y velocidad angular

Si el signo del dato es negativo, será preciso restar el valor 65536 menos el valor entero de los dos bytes que componen el dato. Este resultado se multiplica por una constante obtener el valor de ángulo y velocidad angular. La constante para el dato del ángulo es 0.0109863°/LSB. La constante para el dato del ángulo es 0.0137329°/s/LSB.

Subrutina de cálculo de la integral del error

Esta subrutina calcula en cada iteración el error entre el valor actual del ángulo y el valor deseado, que para esta aplicación es 0º, y va sumando estos errores, considerando que el tiempo entre una medida y la siguiente es de 10ms. De este modo se obtiene la integral del error del ángulo, empleada para el controlador PID.

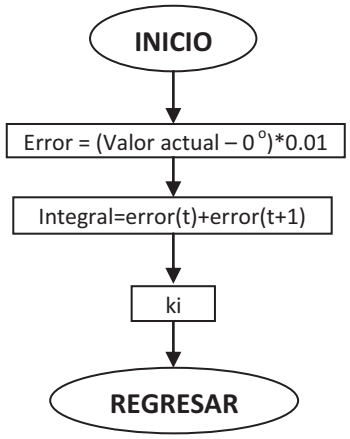


Figura 3.20: Diagrama de flujo subrutina de cálculo de la integral del error

Subrutina de cálculo del valor PID

Esta subrutina multiplica las constantes kp, ki y kd, por el valor actual del ángulo, velocidad angular e integral del error. Todas las operaciones se realizan empleando variables de punto flotante (float).

Subrutina de medición de velocidad lineal

Esta subrutina contabiliza los pulsos del encoder de cada llanta. Estas mediciones permiten calcular la velocidad de la llanta en cada iteración, ya que el período, entre una medición y la siguiente, es fijo y vale 10ms. Mediante operaciones se obtiene el valor de la velocidad lineal en RPM.

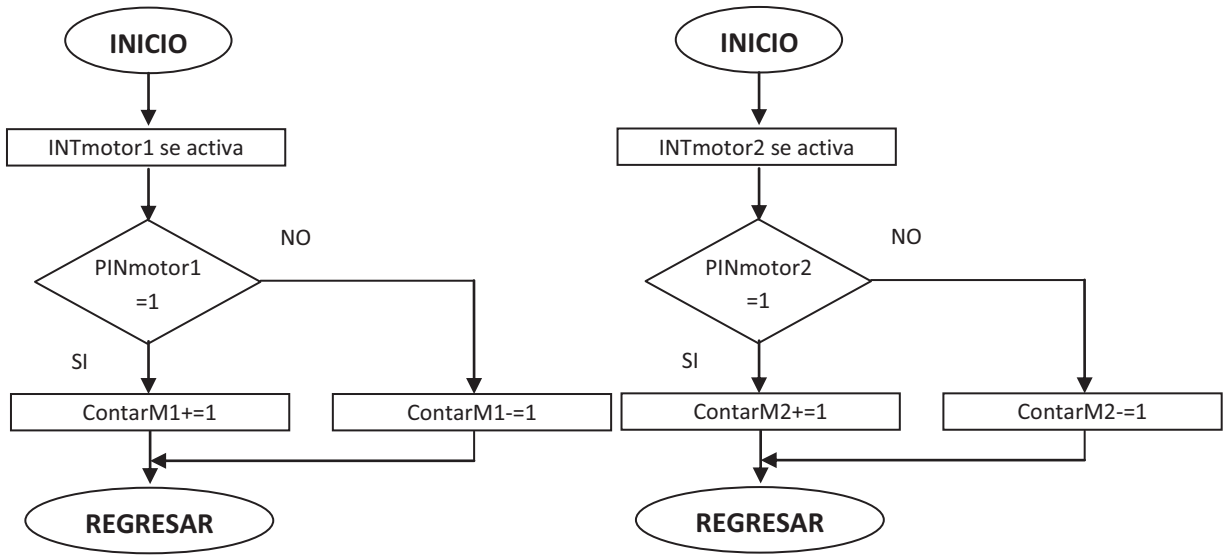


Figura 3.21: Diagrama de flujo subrutina de medición de velocidad lineal

Subrutina de giro o aceleración

Esta subrutina realiza el cálculo del PWM de aceleración o del PWM de giro. En caso de querer acelerar, se va incrementando periódicamente el valor del PWM de aceleración, hasta el valor deseado o hasta llegar a un tope de 512 (PWM de aceleración: 0 – 512, PWM motor: 0-1024). El PWM de giro se calcula con la siguiente fórmula:

$$PWMgiro = \frac{200}{1 + 0.003 * (Valor\ absoluto\ de\ la\ velocidad\ lineal\ actual)}$$

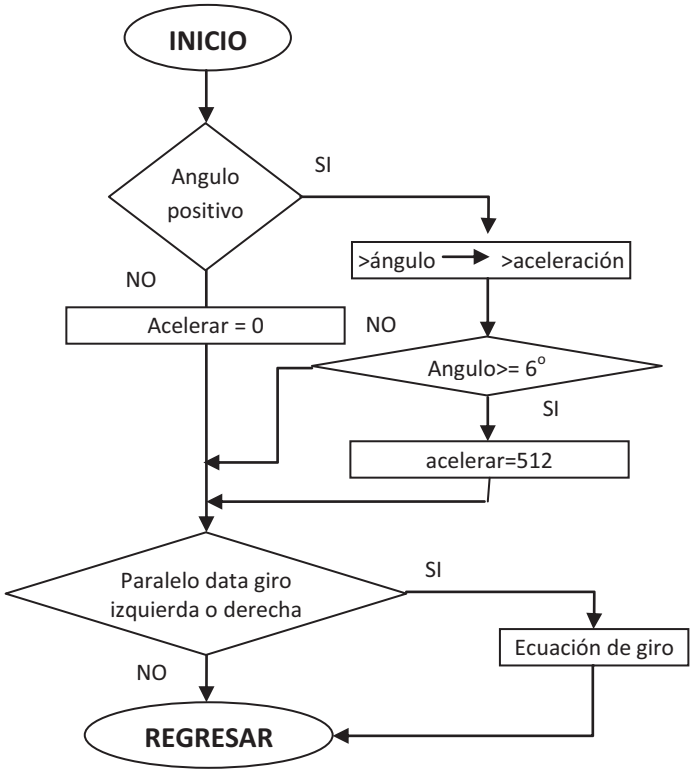


Figura 3.22: Diagrama de flujo subrutina de giro o aceleración

Subrutina de cálculo del PWM

Esta subrutina suma el PWM del control PID, el PWM de giro y el PWM de aceleración. Al motor derecho se aplica el valor calculado de (aceleración + PID) más o menos el PWM de giro de acuerdo hacia donde se desee girar. Al motor izquierdo se aplica el valor calculado de (aceleración + PID) menos o más el PWM de giro de acuerdo hacia donde se desee girar. Figura 3.23.

Subrutina de Visualización

Esta subrutina permite mostrar en el LCD los valores que se desee mostrar sobre el estado actual del vehículo.

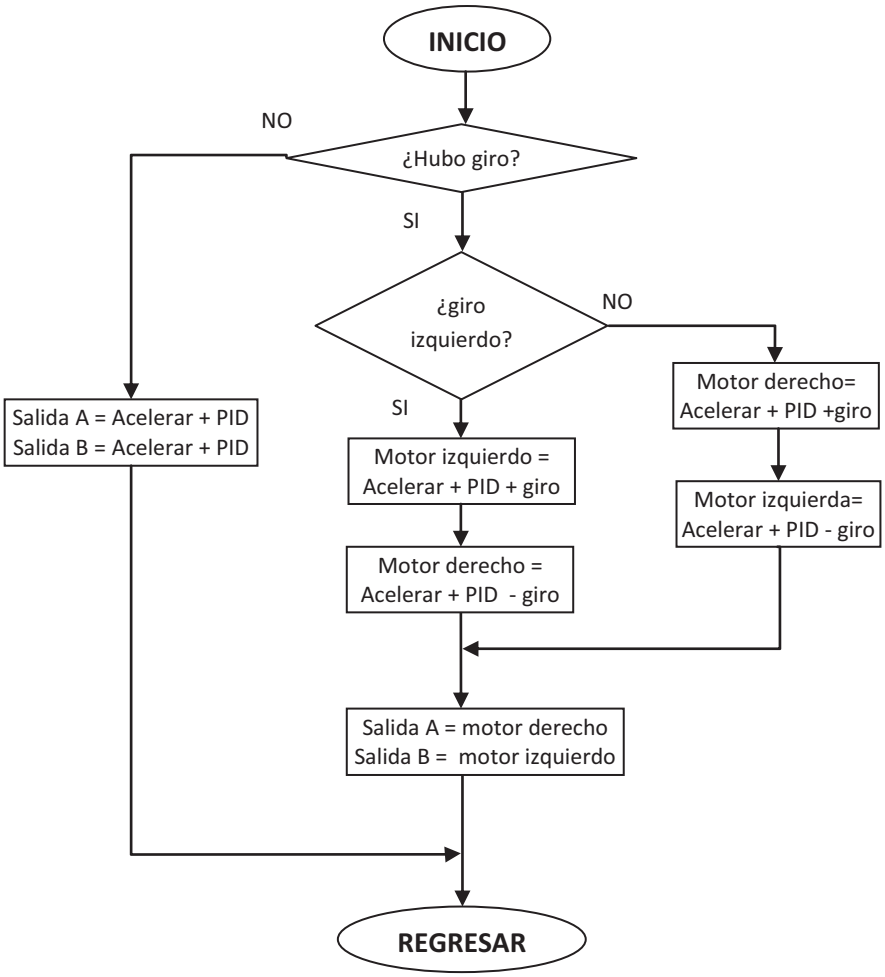


Figura 3.23: Diagrama de flujo subrutina de cálculo del PWM

3.5.2 ATMEGA8

El microcontrolador Atmega8 es el microcontrolador auxiliar de la aplicación. Se encarga de recibir las señales de los pulsadores. Esto lo realiza en su lazo principal, y no por interrupción, debido a que debe discernir entre si se desea girar o acelerar. Una vez hecho esto, indica al microcontrolador principal si la acción deseada es giro o aceleración por comunicación paralela unidireccional.
Se encarga también de enviar al sensor inercial IMU la petición de dato mediante comunicación serial cada 10ms.

Mide el estado actual de las baterías y da una señal de alarma en caso de que el voltaje de las mismas esté por debajo del límite permitido (11V).

En el diagrama se muestra la lógica usada en el programa del Atmega8, donde se puede visualizar las librerías, variables, funciones y el procedimiento desarrollado en el programa.

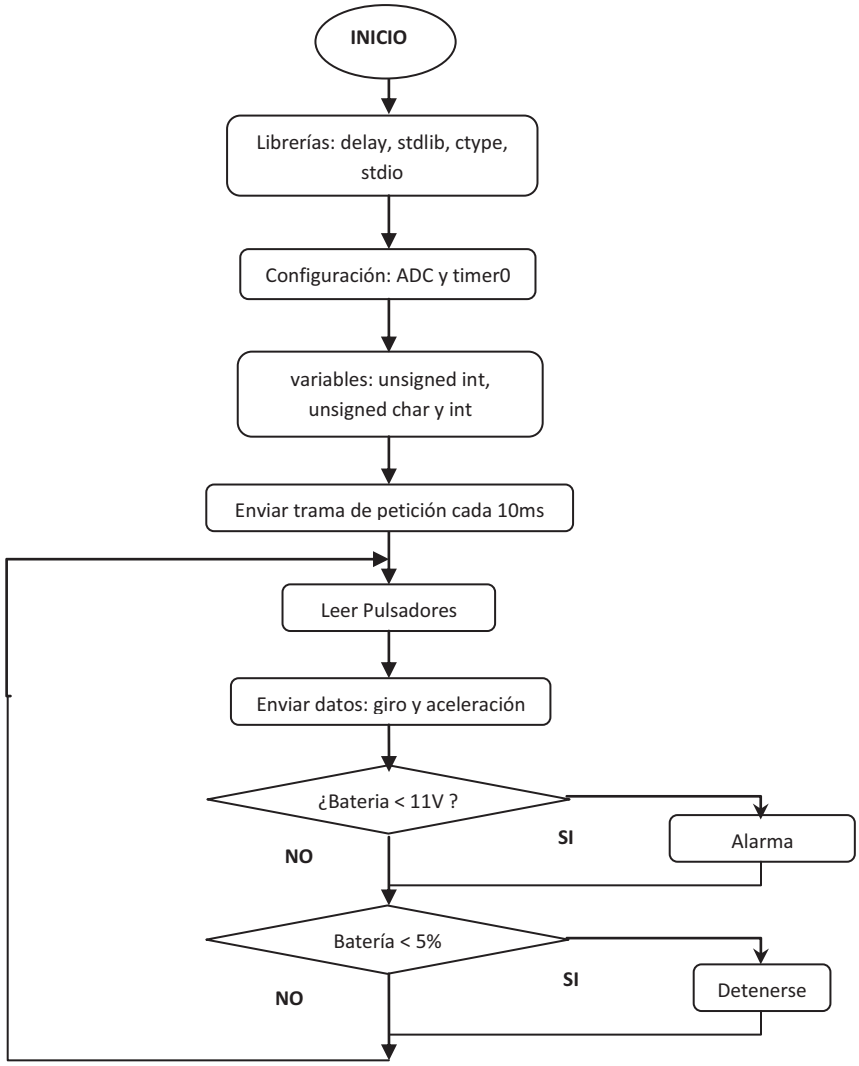


Figura 3.24: Diagrama de flujo rutina de control del microcontrolador Atmega8

Subrutina de petición de paquete de datos

Esta subrutina envía una trama al sensor inercial IMU, para pedir que envíe los datos de ángulo y velocidad angular al microcontrolador Atmega644P. Esto lo realiza de forma sincronizada, mediante un Timer.

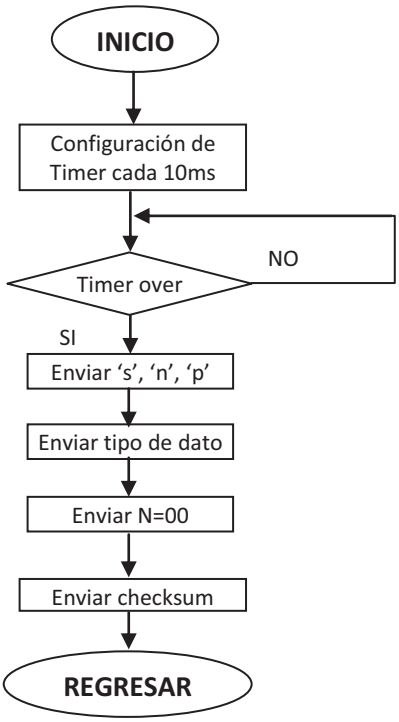


Figura 3.25: Diagrama de flujo subrutina de petición de paquete de datos

Subrutina de medición de Voltaje de Batería

Esta subrutina mediante un canal ADC mide el voltaje actual de la batería e indica el estado de la misma. Si el voltaje es menor a 11V, muestra una alarma.

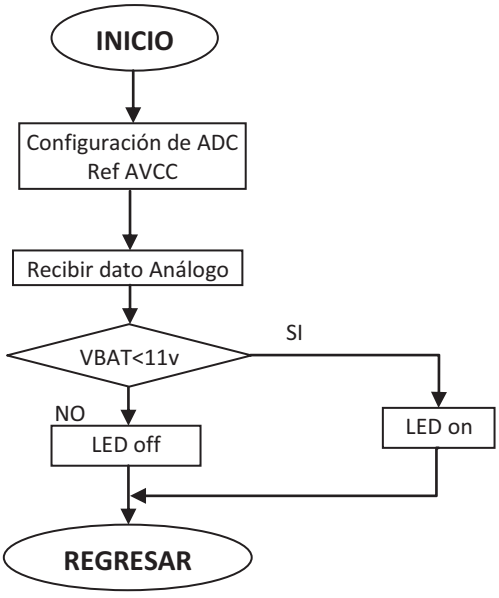


Figura 3.26: Diagrama de flujo subrutina de medición de voltaje de batería

Subrutina de Pulsadores

Esta subrutina mide el tiempo que han sido presionados los pulsadores y determina la acción que el conductor desea realizar, es decir, determina si el conductor desea acelerar o girar. Además envía estos datos por comunicación paralela.

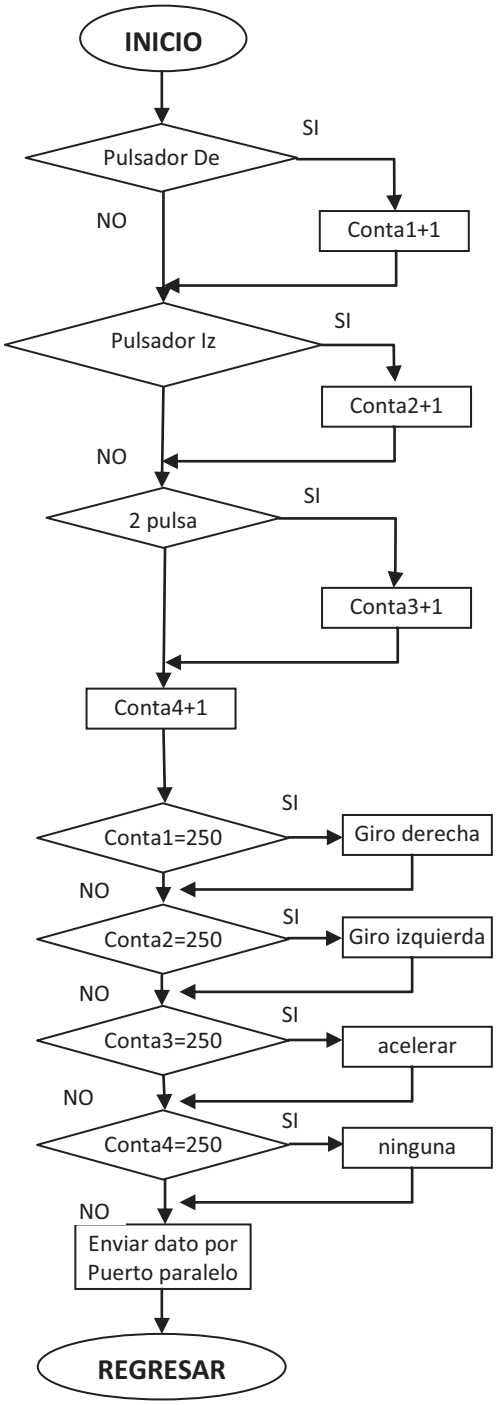


Figura 3.27: Diagrama de flujo subrutina de pulsadores

3.6 MANEJO DE LINK SIMMECHANICS PARA OBTENER EL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL [41]

Este software requiere de MatLab y su Toolbox SimMechanics. Este complemento genera modelos físicos a partir de archivos XML generados por una aplicación externa tal como una plataforma de diseño asistido por computador (CAD) [42]. Link SimMechanics trabaja con SimMechanics 3.0 o superior y con Matlab R2008b o superior. (Figura 3.28)

SimMechanics Link	MATLAB	SolidWorks	Pro/Engineer	Autodesk Inventor
3.2.1	R2010b	2001Plus through SolidWorks 2010	Wildfire 2.0 through Wildfire 5.0	2009-2011
3.2	R2010a	2001Plus through SolidWorks 2010	Wildfire 2.0 through Wildfire 5.0	2009-2010
3.1.1	R2009b	2001Plus through SolidWorks 2009	Wildfire 2.0 through Wildfire 4.0	2009
3.1	R2009a	2001Plus through SolidWorks 2009	Wildfire 2.0 through Wildfire 4.0	2009
3.0	R2008b	2001Plus through SolidWorks 2009	Wildfire 2.0 through Wildfire 4.0[1]	

Figura 3.28. Versiones de compatibilidad de SimMechanics Link

Para obtener este modelo se deben seguir los siguientes pasos:

- Se debe descargar el software de la página: http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_smlink.html

- Se instala el complemento en MatLab, introduciendo el comando en la ventana de trabajo (Figura 3.29):
  >> install_addon(‘archivo_zip_de_la_versión_adecuada’) para este caso
  >>install_addon('smlink31.win32.zip')

- Se registra MATLAB como Automation Server, para ello es necesario introducir el siguiente comando en MatLab.
  >> *regmatlabserver*

- Conectar MatLab como un Automation Server desde una aplicación externa donde para ello se introduce el siguiente comando en la línea de comandos.
  >> *enableservice('AutomationServer',true)*

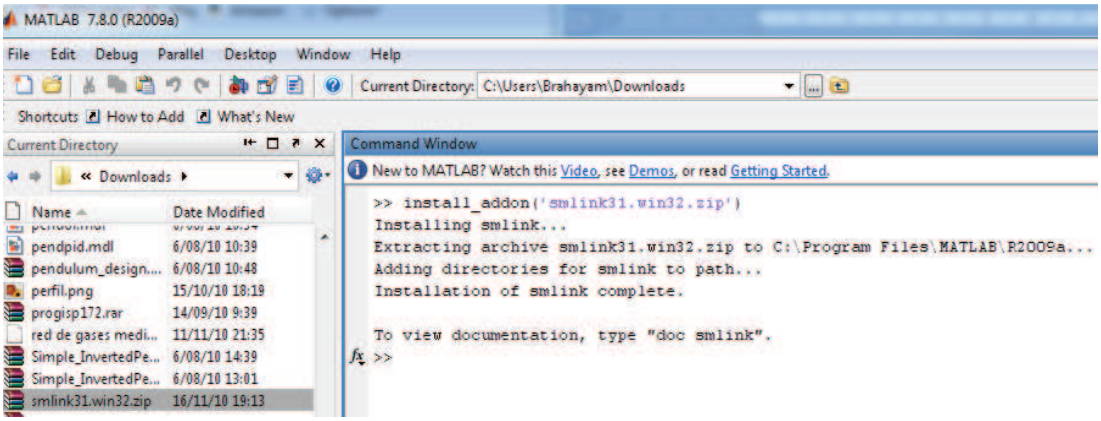


Figura 3.29: Instalación en Matlab del software Link SimMechanics

- Conectar MATLAB a SOLIDWORKS (Plataforma CAD)

3.6.1 PASOS EN MATLAB:

- Iniciar Matlab.
- Introducir el comando “smlink_linksw” en la ventada de trabajo y se recibe un mensaje de link exitoso.
- Cerrar MatLab.

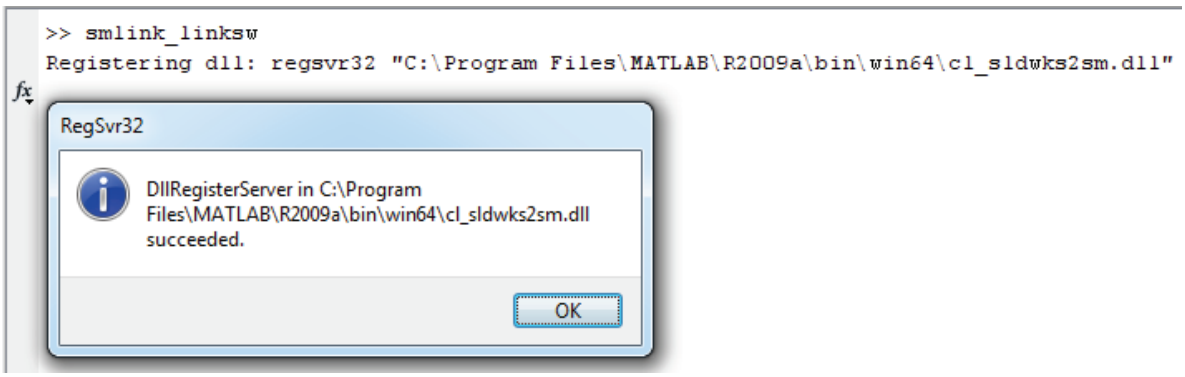


Figura 3.30: Comando para enlazar MatLab a SolidWorks desde MatLab.

3.6.2 PASOS EN SOLIDWORKS:

- Iniciar Solidworks
- En Herramientas, seleccionar Add-Ins o Complementos y poner un visto junto a SimMechanics Link (Figura 3.31).

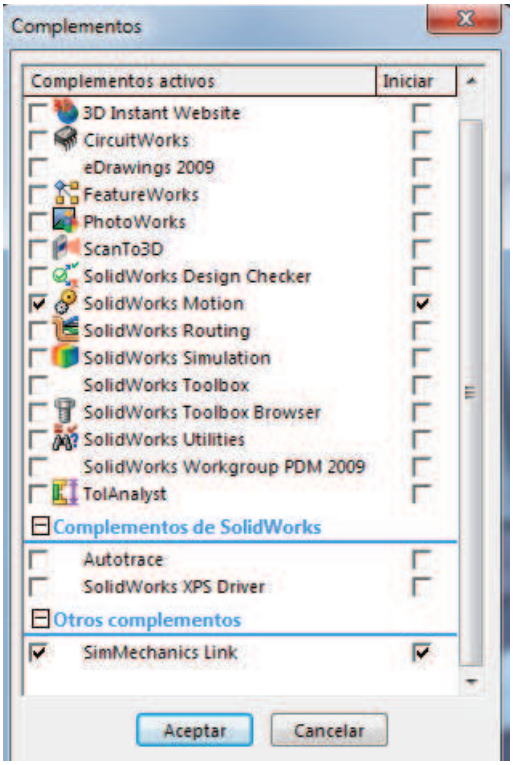


Figura 3.31: Comando para enlazar MatLab a SolidWorks desde Solidworks.

Una vez hecho esto es necesario abrir el proyecto en Solidworks y guardarlo en una carpeta con la extensión XML. Este proyecto ensamble contiene todas las piezas del vehículo, introducidas una por una (Figuras 3.32 y 3.33).

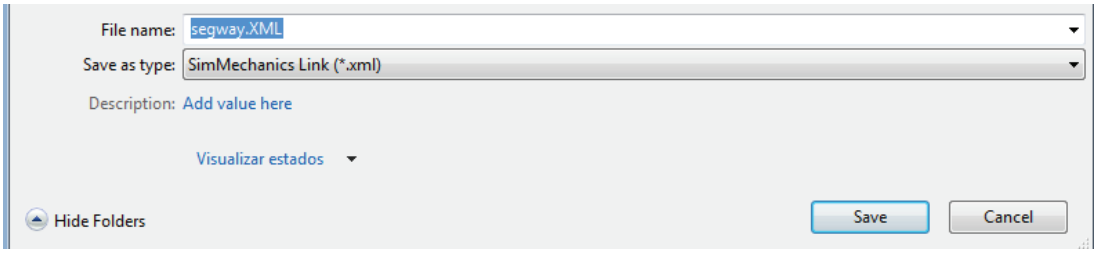


Figura 3.32: Generación de archivos XML

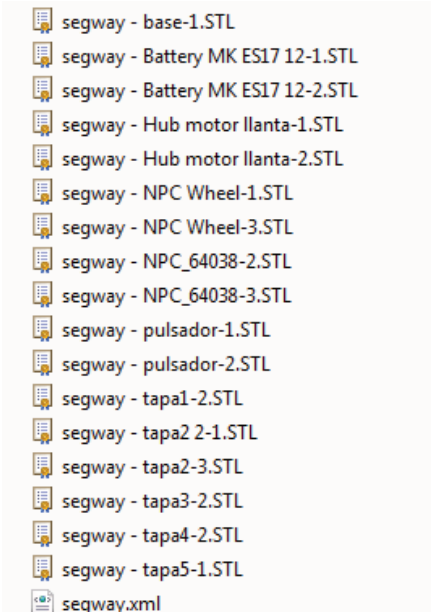


Figura 3.33: Archivos XML generados

- Se ingresa en MATLAB el comando en la ventana de trabajo:
  >> mech_import('segway.xml')

El cual genera un modelo complicado parecido al que se muestra en la Figura 3.34.

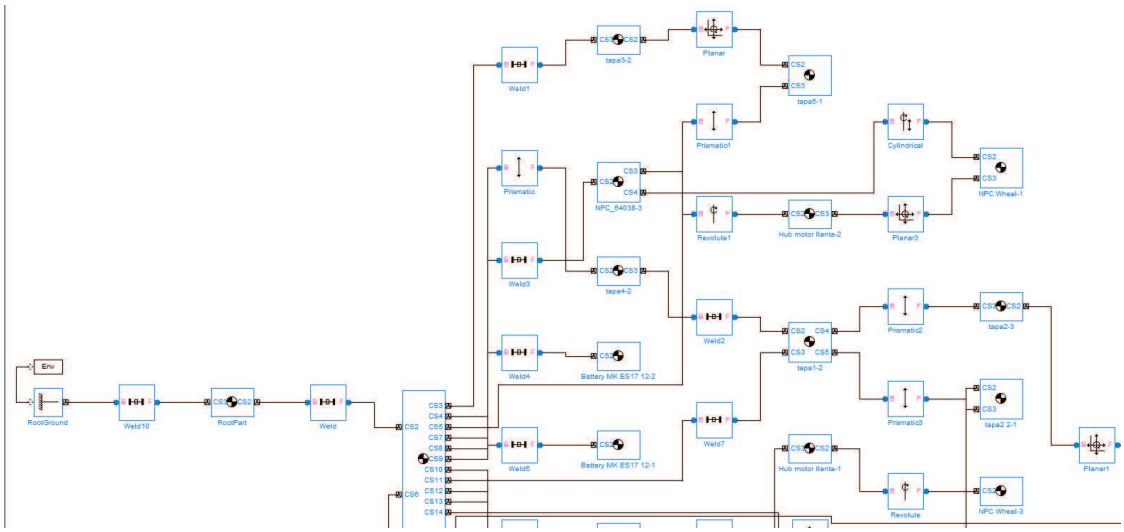


Figura 3.34. Modelo generado sin simplificación.

La complejidad de este modelo radica en que el ensamble de Solidworks fue realizado de pieza en pieza.

Para obtener un modelo manejable y posteriormente controlable, es preciso realizar el ensamble en SolidWorks de la siguiente manera:

- No deben colocarse todos los componentes en un mismo ensamble, sino que deben hacerse tres ensambles.
- El primer ensamble debe contener el modelo de la persona y la estructura mecánica.
- El segundo ensamble debe contener el modelo de los motores y los neumáticos.
- El tercer ensamble se forma empleando los dos ensambles anteriores. Se debe ingresar en primer lugar el segundo ensamble como base, que irá ligada a tierra.

El modelo simplificado en MATLAB se lo puede encontrar en la Figura 1.13.

En la Figura 3.35 se puede ver la ventana simulación del modelo en MatLab SimMechanics con herramientas bastante útiles.

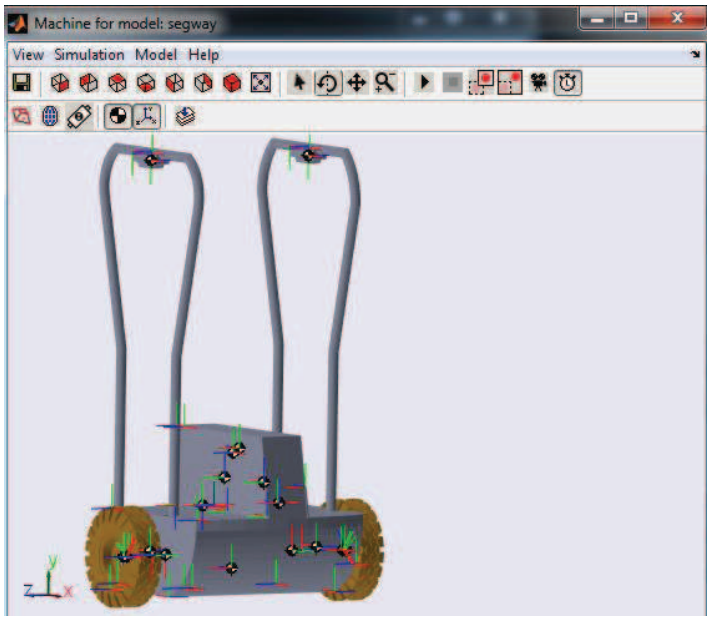


Figura 3.35: Simulación del modelo en MatLab-SimMechanics.

Como se observa en la Figura 3.35 el modelo físico construido en Solidworks es visualizado mostrando las referencias de coordenadas de cada parte que forma el modelo físico, como lo son las llantas, los motores, la estructura, los controladores, los botones de giro, las baterías y demás partes.

La Figura 3.36 contiene el modelo de la Figura 1.13 pero como un subsistema, para facilitar su visualización y posterior sintonización del controlador.

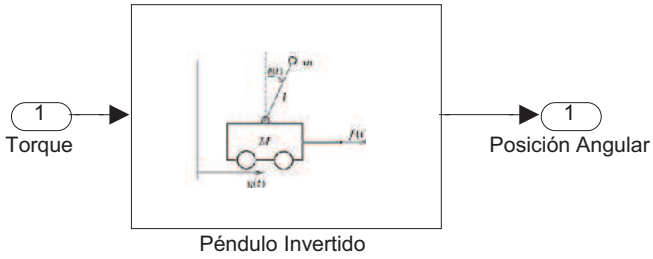


Figura 3.36: Modelo del sistema como subsistema en Simulink

Para terminar es necesario obtener la función de transferencia para su análisis en lazo abierto y en lazo cerrado, esto se realiza escribiendo los siguientes comandos en la ventana de trabajo:

Se escribe >> [A,B,C,D]=linmod(*'nombre del modelo*'), en este caso se llama '*modelo*'. A continuación se escribe >>sys_ol=ss (A,B,C,D). Para guardar en la variable "sys_ol" el modelo a variables de estado.

>> sys_ol=ss(A,B,C,D)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 14.51 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.2231 \end{bmatrix}$$

$$C = [57.3 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Lo cual visto en forma matricial queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{14.51} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0.2231} \end{bmatrix} * \boldsymbol{F}$$

$$[\boldsymbol{Y_1}] = [\mathbf{57.3} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] * [\boldsymbol{\theta}]$$

O como función de transferencia:

```
>> sys1=tf(sys)
```

$$FT = \frac{7.479}{s^2 - 14.23}$$

3.7 CONTROL DE EQUILIBRIO CON CONTROLADOR PID

Las variables que más interesan son la posición angular y velocidad angular del vehículo, por lo tanto el PID tomará como entrada estas variables y su salida será el torque requerido por los motores. Se trabaja con el diagrama de bloques construido con SimMechanics (MATLAB) y un lazo con un PID observado en la Figura 1.14.

3.7.1 RESPUESTA INICIAL DEL SISTEMA

Para ello se usa la herramienta SISOTOOL de Matlab ingresando en la ventana de trabajo el siguiente comando:

```
>>sisotool(sys1)
```

Esta herramienta permite realizar el análisis de la planta visualizando el diagrama de polos y ceros (Figura 3.37) donde se observa que el sistema es inestable porque existe un polo en el semiplano derecho. También se demuestra en la Figura 3.38, donde se hace el análisis para obtener la respuesta a una entrada paso.

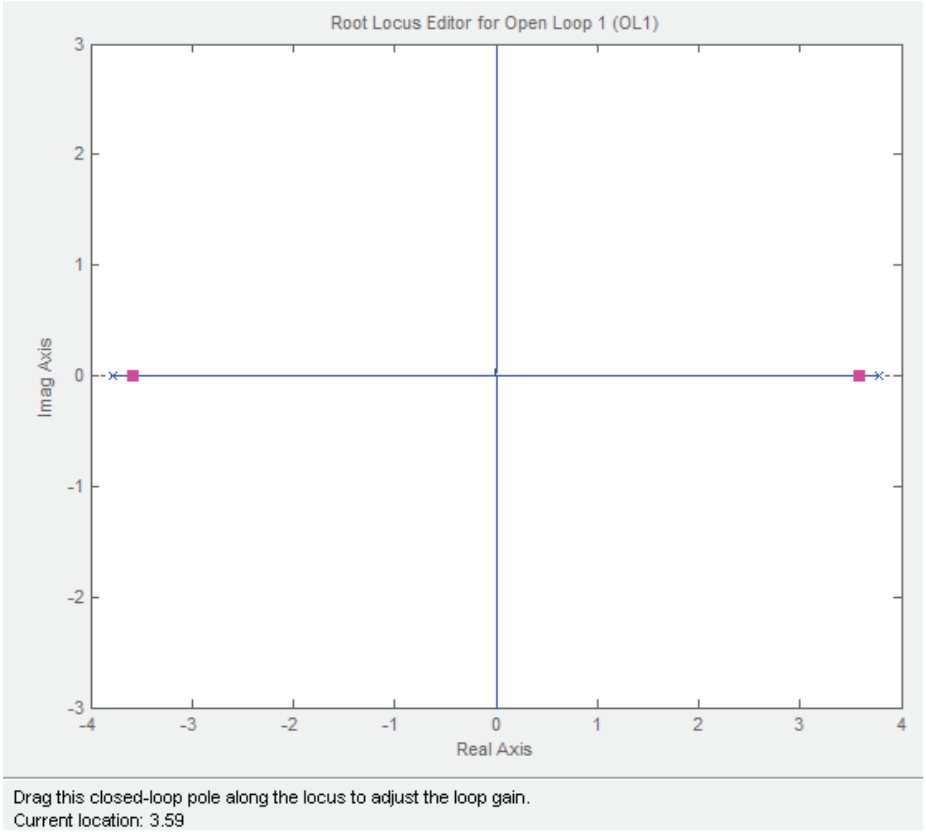


Figura 3.37: SISOTOOL: Polos a lazo abierto del sistema

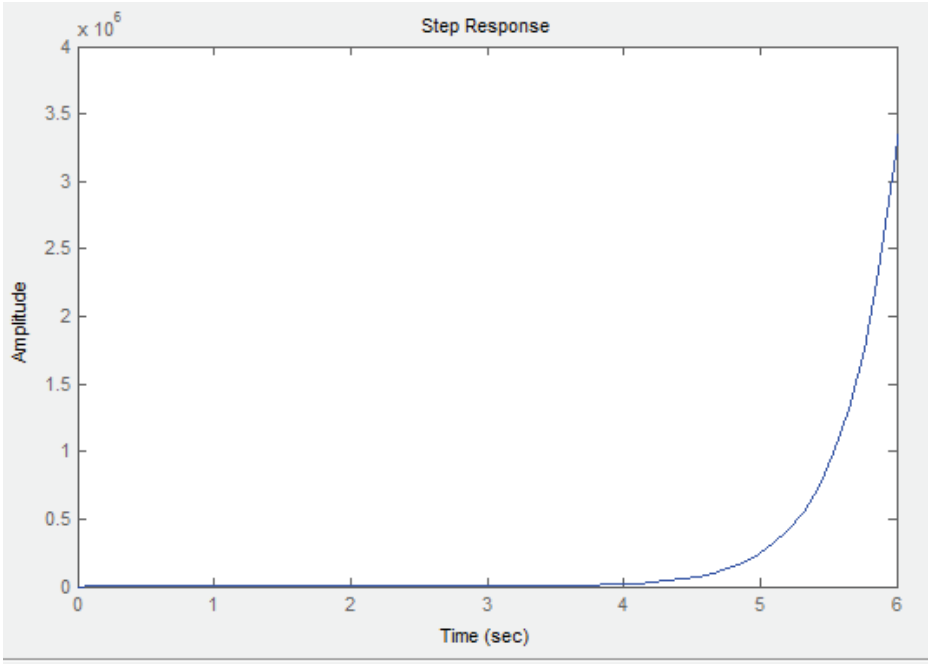


Figura 3.38: Respuesta a la entrada paso en laso abierto

3.7.2 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL AUTOMÁTICAMENTE GENERADO

SISOTOOL también permite generar automáticamente un control que estabilice al sistema. Para ello se abre la pestaña *Automated Tuning,* desplazamos el mouse a *Design Method* y se escoge la opción de *PID tuning* (Figura 3.39).

En la nueva ventana de configuración (Figura 3.40) se escoge el tipo de controlador, el cual para el presente proyecto es PID y se escoge *Performance Metric,* la opción *Integral Absolute Error (IAE).*

Después se desplaza el mouse al botón *update compensator* donde Matlab calcula automáticamente el controlador y éste se visualizará en la ficha Compensator.

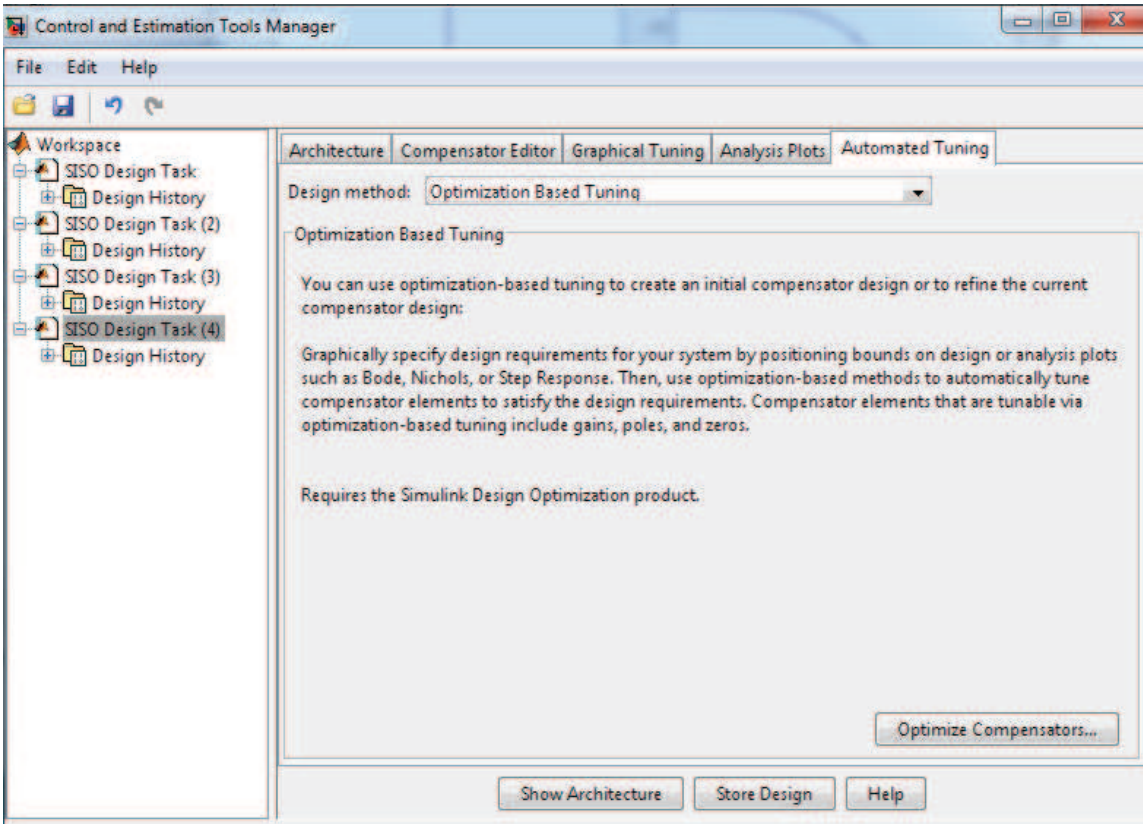


Figura 3.39: Automated Tuning

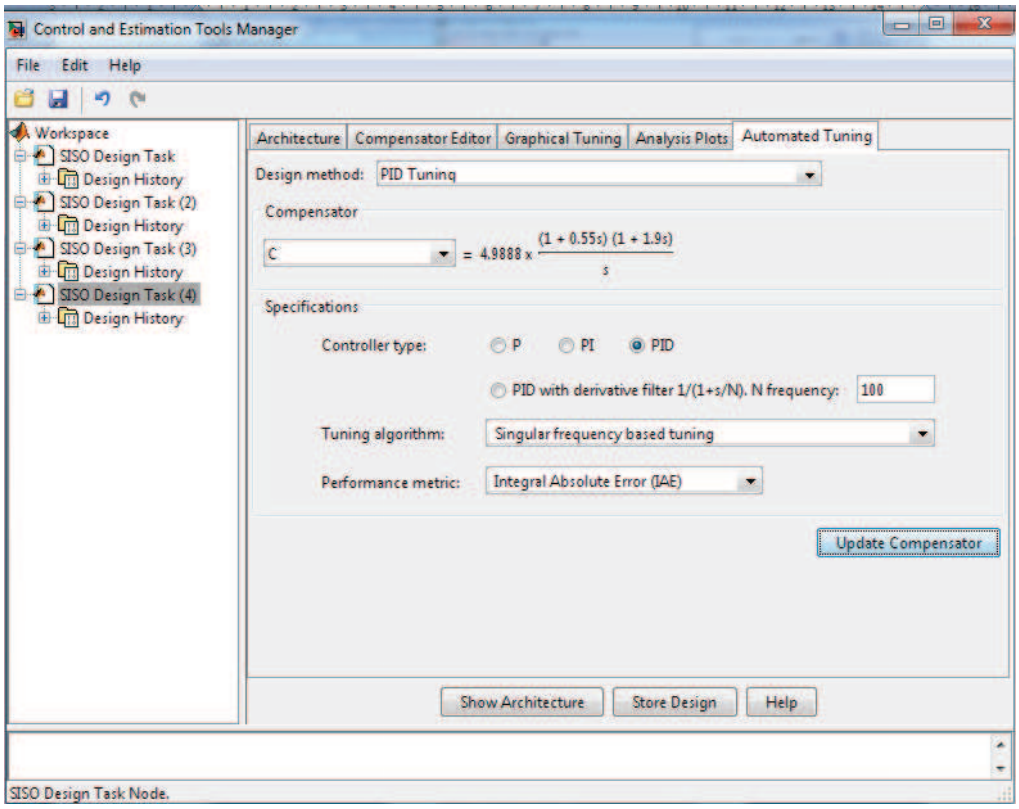


Figura 3.40: Configuración para obtener el controlador PID

La función de transferencia del controlador obtenido es la siguiente:

$$C = 4.99 * \frac{(1 + 0.55s)(1 + 1.9s)}{s}$$

$$C = \frac{4.99}{s} * (1.045s^2 + 2.45s + 1)$$

$$C = \left(5.2145s + 12.2 + \frac{4.99}{s}\right)$$

Donde:

$$C = \left(Ds + P + \frac{I}{s}\right)$$

P=12.2

I=4.99

D=5.2145

Se escribe los valores (Figura 3.41) en la simulación creada en Simulink (Figura 1.14) en el bloque PID.

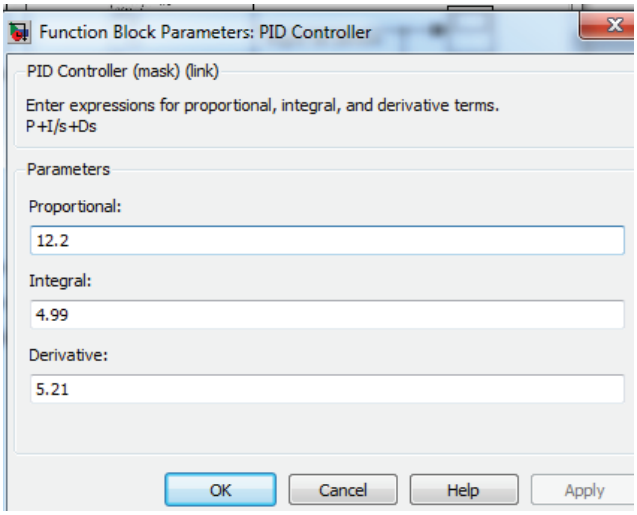


Figura 3.41: Valores PID en lazo de simulación

Se activa la simulación y se observa (Figura 3.42) la respuesta a la entrada paso, que se obtiene al controlador creado, donde a simple vista el sobreimpulso y el tiempo de estabilización no son los requeridos, pero a pesar de eso el sistema se estabiliza con error cero.

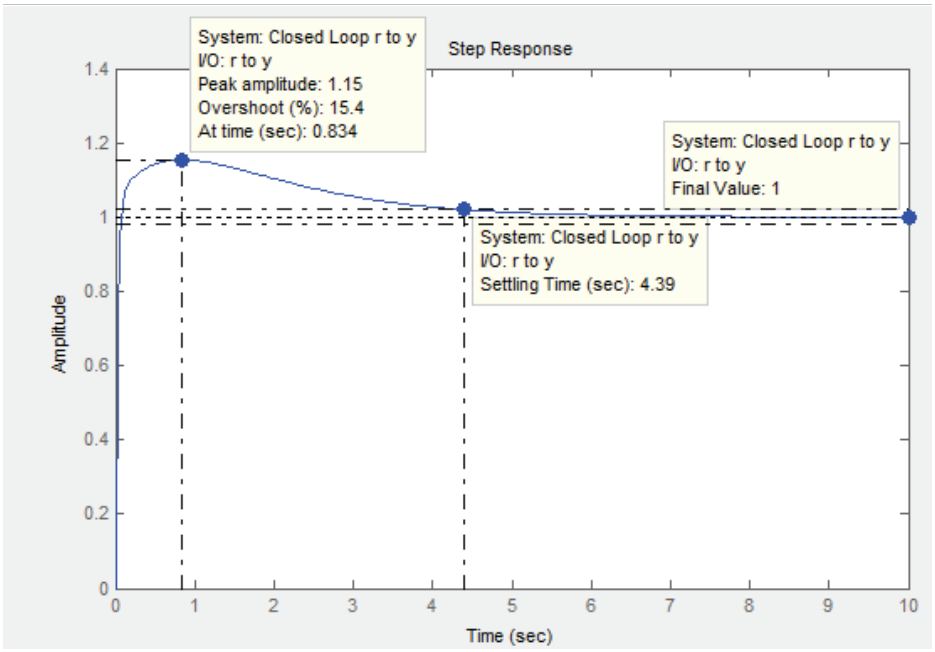


Figura 3.42: Respuesta al control autogenerado

En el diagrama de polos y ceros (Figura 3.43) se observa que ahora los polos se ubican en el semiplano izquierdo, por lo que el sistema es estable.

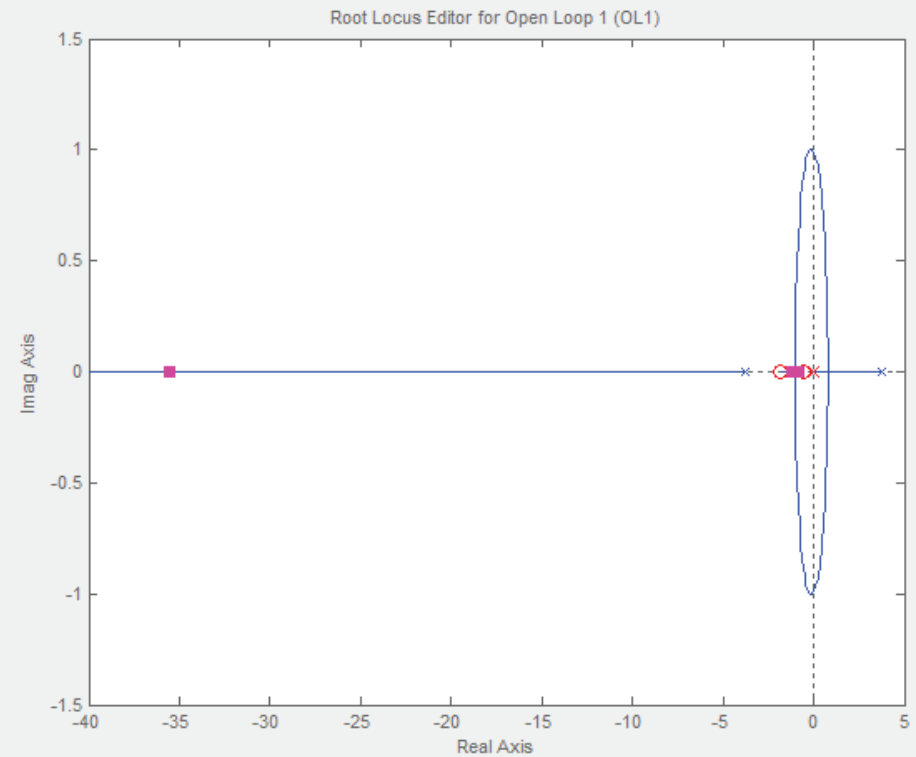


Figura 3.43: Diagrama de polos y ceros del sistema a lazo cerrado

3.7.3 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR PID CALIBRADO

El modelo matemático obtenido por Solidworks y SimMechanics dio una referencia bastante próxima de los valores a calibrar Kp, Kd y Ki. Los mismos que se implementaron con potenciómetros en la placa para un ajuste fino sencillo.

El ajuste final se realiza de forma práctica en el vehículo hasta llegar a ver que éste, estabilice a una persona. Los nuevos valores en el PID se los puede ver en la Figura 3.44.

Los nuevos valores de las constantes calibradas, las cuales fueron visualizadas en el display del vehículo, son escritos en la simulación para analizar la respuesta obtenida y determinar que características como sobre impulso, tiempo de

estabilización y error se tienen. Para ello se entra nuevamente en SISOTOOL y se busca la pestaña *Compensator Editor,* aquí se actualiza el controlador. (Figura 3.45).

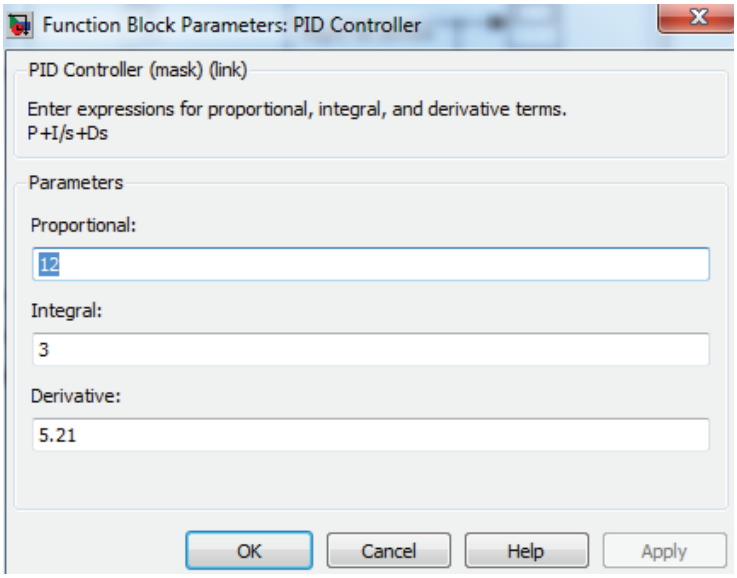


Figura 3.44: Nuevas constantes en el controlador PID

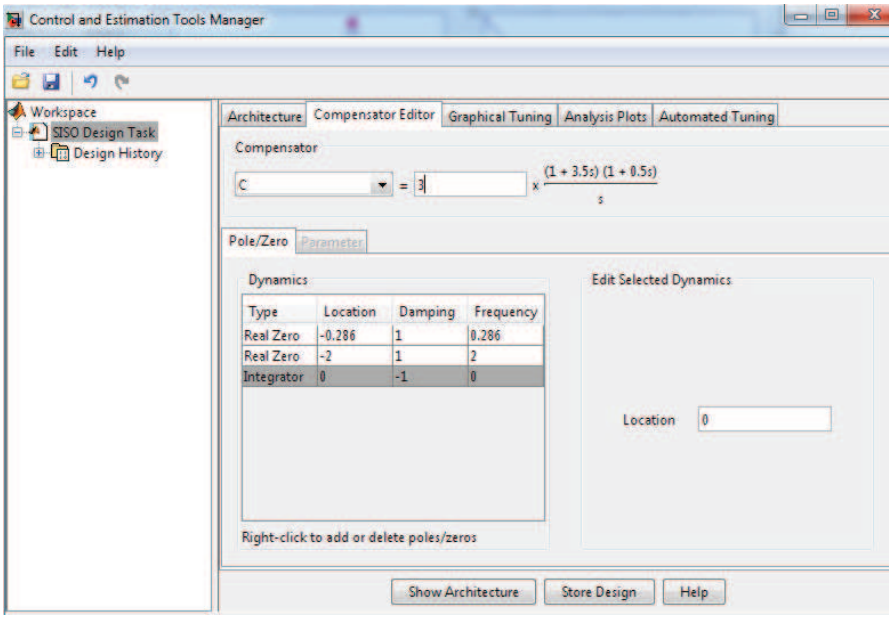


Figura 3.45: Edición del nuevo controlador PID

$$C = \left(5.21s + 12 + \frac{3}{s}\right)$$

$$C = \frac{3}{s} * (1.7367s^2 + 4s + 1) = \frac{3}{s}(1 + 0.5s)(1 + 3.5s)$$

Una vez actualizado se puede observar las características del nuevo ajuste a la respuesta de una entrada paso (Figura 3.46). Debido a que la respuesta obtenida es satisfactoria de forma práctica, se mantiene esta calibración como definitiva.

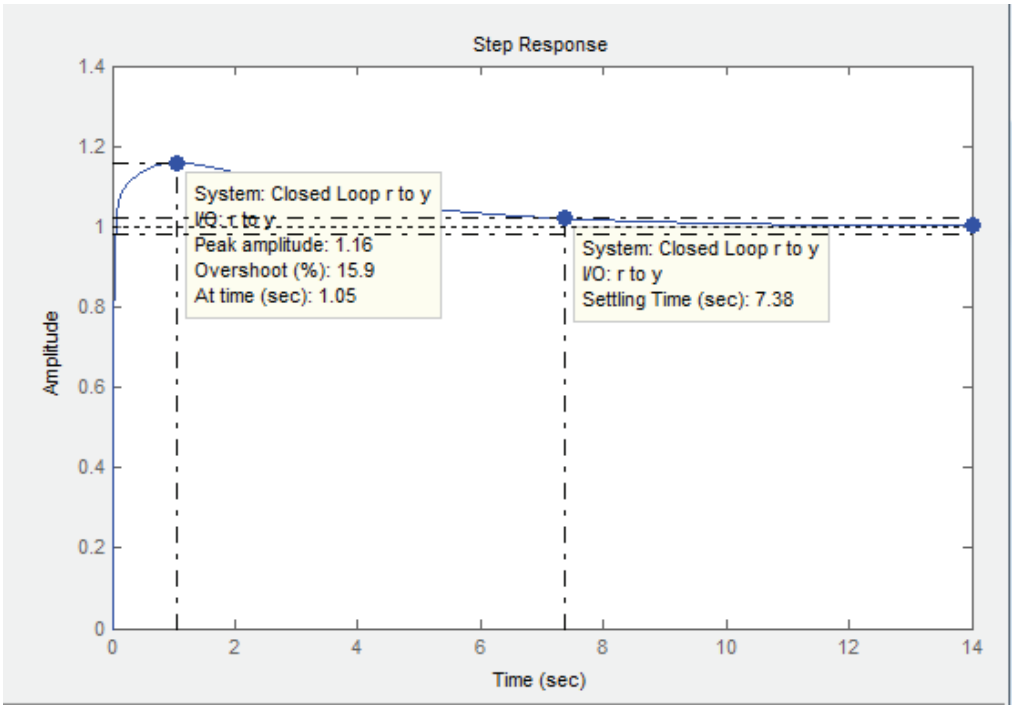


Figura 3.46: Respuesta a la entrada paso del controlador calibrado

De forma práctica, el controlador ajustado con estos valores, hace que el vehículo presente una pequeña vibración cuando existe un cruce por cero del ángulo de inclinación; sin embargo existe un compromiso entre equilibrio y vibración; es decir, si se disminuye el valor de los parámetros de calibración el vehículo deja de vibrar, sin embargo se siente mayor inestabilidad en el vehículo. Se ajustó los parámetros todo lo posible de modo que la vibración disminuya, pero no se vea afectada la estabilidad.

CAPITULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CONTROLADOR OSMC

Se obtuvo la curva Velocidad en vacío del motor vs. PWM aplicado, que representa el Setpoint del motor, resultado del algoritmo de control, y se pudo determinar que existe una relación lineal entre estas variables.

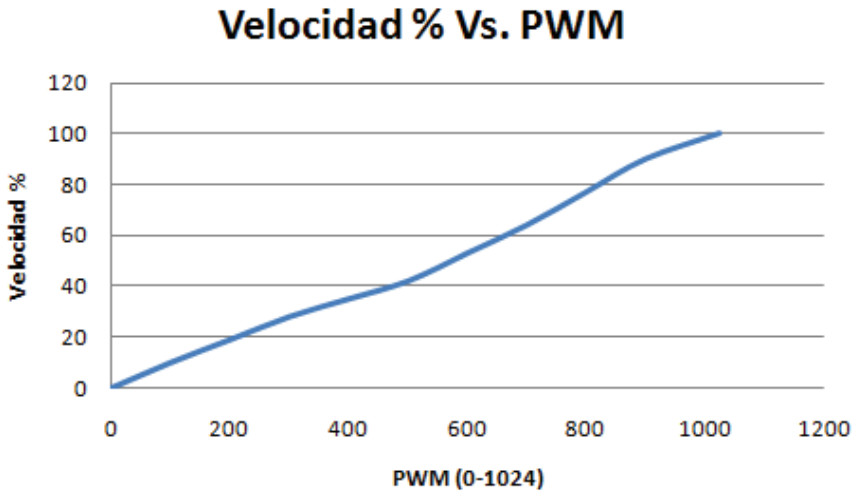


Figura 4.1: Curva característica del motor: PWM Vs. Velocidad

4.2 INSTRUMENTACIÓN Y SENSORES

Como se ha explicado, el sensor principal para la estabilidad es la unidad de navegación inercial (IMU por sus siglas en inglés). La IMU seleccionada realmente ha cumplido de forma eficiente con las expectativas de estimación de ángulo y velocidad angular para el algoritmo de control. La estimación es digital y provee una resolución de 0.0096 grados, lo que ofreció, una vez calibrado el sensor, una medición de las variables lo suficientemente precisa para controlar el vehículo. Los resultados de la estimación del sensor son transmitidos por

comunicación serial RS-232, lo que es ventajoso por una parte ya que no se tienen los problemas de ruido como se tiene en la medición de una variable analógica, pero por otra parte la comunicación serial RS-232, pese a que se realiza a 115200 baudios, no es tan rápida como una comunicación SPI. Sin embargo el algoritmo de control se realiza a 100Hz, y el sensor es capaz de entregar datos actualizados a una tasa máxima de 300Hz, lo que rebasa las necesidades de la aplicación.

Los encoders empleados son de 90 pulsos por revolución. Como los encoders se instalaron en el lado de alta velocidad de la caja de fuerza de relación 20:1, se tiene en realidad 1800 pulsos por vuelta de la rueda, lo que significa una resolución de 0.2 grados por pulso. Lo cual fue suficiente para la medición de la velocidad del vehículo, necesaria para determinar su rapidez del giro permitida.

4.3 CONTROL DE ESTABILIDAD

El sistema de control se diseñó considerando al pasajero como una barra rígida. De forma real, el pasajero no se encuentra inmóvil ni mucho menos rígido, sino que por el contrario se mueve inconscientemente para mantenerse estable, lo que ayuda al sistema en el control de la estabilidad. Este hecho favorece al funcionamiento del vehículo. La resolución del sensor en la medición del ángulo, permite realizar un control fino a baja velocidad. Sin embargo, para alcanzar una velocidad mayor, es necesario inclinarse un ángulo mayor al deseable en el funcionamiento óptimo que sería cero en el caso ideal. Pero esto no se puede conseguir ya que en un sistema real el ángulo no se puede mantener en cero porque el vehículo no avanzaría sino que estaría para atrás y para adelante, manteniendo la estabilidad. La evaluación general del vehículo se considera aceptable con respecto a los objetivos inicialmente planteados y al presupuesto.

La presencia de la saturación en la entrada de los motores determina que para ángulos grandes el control no pueda conseguir la estabilidad del vehículo. Esto como consecuencia de que para ángulos mayores a un ángulo crítico, es

necesaria una respuesta mayor al valor de saturación, que físicamente no puede ser aplicada a los motores. Este es uno de los factores que limitan la estabilidad del vehículo.

Experimentalmente, se ha observado que el ángulo crítico de estabilidad es -6°, cuando el vehículo avanza. Para retroceder el ángulo crítico de estabilidad es menor, su valor es de 5°. Esto ha sido determinado registrando datos en el microcontrolador y posteriormente mostrándolos en el LCD.

Figura 4.2: Datos registrados en el LCD – Ángulo en esquina inferior izquierda **a)** Ángulo crítico al retroceder **b)** Ángulo crítico al acelerar

Teóricamente el ángulo crítico de estabilidad es de 7.82°, calculado mediante simulación en MatLab.

Otro factor a considerar es que el algoritmo de control se lo diseña como si fuese un sistema continuo, pero en la realidad lo que se tiene es un sistema discreto, de modo que el tiempo de muestreo T, que se seleccione, influye de forma determinante en la estabilidad del sistema. Así, como es evidente, a mayor tiempo de muestreo se pierde estabilidad porque el sistema se aleja del comportamiento continuo en sus respuestas; a menor tiempo de muestreo el sistema se aproxima a un sistema continuo, sin embargo no es posible llegar a un sistema continuo, porque la velocidad de respuesta de los diferentes dispositivos involucrados (actuadores, sensores, controladores) es limitada.

Adicionalmente cada uno de estos dispositivos involucra un tiempo de retraso o retardo que limita aún más la velocidad a la que puede ejecutarse el bucle de lazo cerrado.

4.4 PRUEBA DE GIRO

El PWM de giro es función de la velocidad lineal del vehículo.

$$PWMgiro = \frac{200}{1 + 0.003 * (Valor\ absoluto\ de\ la\ velocidad\ lineal\ actual)}$$

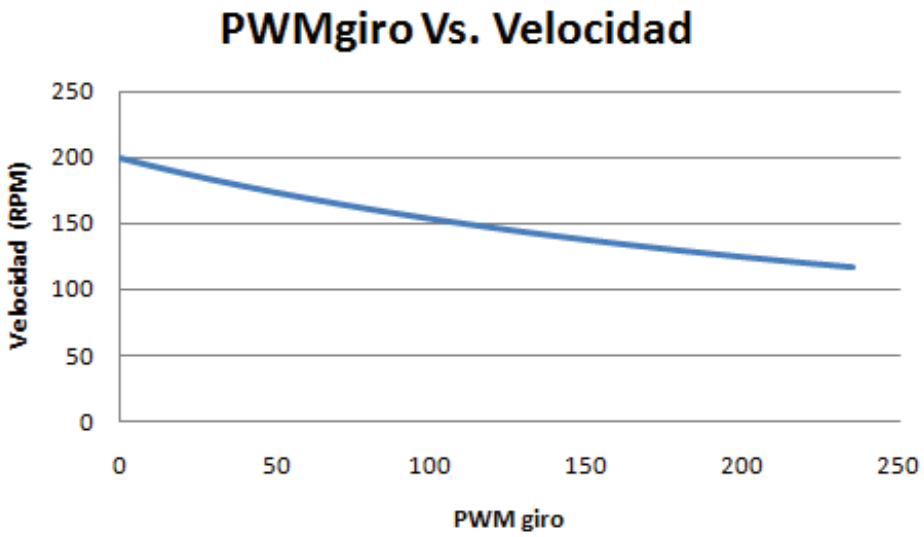


Figura 4.3: Curva característica del PWM de giro

La forma de esta curva se debe a que a baja velocidad, el vehículo debe ser capaz de girar incluso sobre su propio eje, por eso se tiene un alto PWM, sin embargo a alta velocidad no puede girar a la misma velocidad, sino que debe hacerlo a una velocidad segura, es decir, con un valor menor de PWM. El ajuste de giro de esta curva se lo realizó de forma experimental, teniendo en cuenta siempre que el movimiento no sea brusco, de forma que la estabilidad del vehículo no se vea comprometida.

El PWM puede tomar valores entre 0 y 1024, lo que corresponde a aplicar un voltaje entre 0 y 24V a los motores. El control de giro se realiza mediante pulsadores ubicados en cada uno de los apoyos laterales del vehículo. Mientras se presiona el pulsador, el vehículo gira al lado correspondiente al pulsador que haya sido presionado.

4.5 PRUEBA DE ACELERACIÓN

Como todo vehículo, este prototipo requiere un mecanismo de aceleración, lo cual se realiza presionando ambos pulsadores simultáneamente. Los mismos pulsadores que se usan para el giro, también se emplean para acelerar. En un Segway comercial se circula, cuando se está en modo de baja velocidad, a 9.6km/h, por tanto en este prototipo se ha determinado que la aceleración debe ser tal, de modo que la velocidad no supere los 10km/h. El PWM de aceleración puede tomar valores entre 0 y 512, siendo el valor máximo del PWM de control 1024 (correspondiente a 24V.)

Figura 4.4: Prototipo **a)** acelerando **b)** en rampa

4.6 ESPECIFICACIONES

Como resultado del trabajo se tiene la construcción de un vehículo funcional, capaz de transportar a una persona sin inconvenientes de un lugar a otro, luego de cierto tiempo de entrenamiento. En la Tabla 4.1 se detallan algunas características finales del vehículo.

La integración entre la electrónica de control, electrónica de potencia y la instrumentación del vehículo conocido como Segway [43] ha alcanzado su madurez tras mucho tiempo e inversión en investigación y desarrollo, del mismo

modo el diseño y construcción de este prototipo de vehículo de 2 ruedas, tanto así que es posible implementar y probar nuevas estrategias de control de forma segura.

Peso	**50[kg]**
Velocidad máxima	10[km/h]
Pendiente máxima	20°
Ruedas	14[pulg]
Autonomía	30min
Ancho	75[cm]
Alto	117[cm}
Largo	45[cm]
Distancia del chasis al suelo	7[cm}
Radio de giro	Sobre su propio eje

Tabla 4.1: Características básicas del prototipo

4.7 ANALISIS DE COSTOS – PRESUPUESTO

El análisis de costos asociados al desarrollo del prototipo se lo realiza en base a tres puntos fundamentales:

- Costo de materiales
- Costo de construcción del prototipo
- Costo de ingeniería

4.4.1 COSTO DE MATERIALES

Sistema mecánico

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Costo total
2	U	Motorreductor DC 24Vdc, relación 20:1 modelo NPC-T64 de NPC Robotics	493.2	986.4
2	U	Adaptador Eje-Rueda NPC-PH448 de NPC Robotics	32	64
2	U	Ruedas neumáticas de 14” de NPC Robotics	138	276
2	U	Batería NPC-B1412 de NPC Robotics	145	290
35	U	Tornillos 5/16-24-UNF de longitud 16mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912	0.14	4.9
1	U	Placa de hierro negro de 2mm de dimensiones: 400x600 x2mm	10	10
2	U	Placa de hierro negro de 2mm de dimensiones: 490x200x2mm	5	10
4	ML	Tubo de aluminio	2.5	10
2	U	Pulsadores de bus	5	10
TOTAL				1661.3

Tabla 4.2: Desglose de costos de materiales del sistema mecánico

En la Tabla 4.2 se detalla los elementos empleados para la construcción del sistema mecánico o esqueleto del prototipo. Los costos presentados comprenden los costos de compra del ítem, aranceles de importación del ítem y transporte, a excepción de los elementos adquiridos localmente, que únicamente reflejan su precio de compra.

En la Tabla 4.3 se detallan los costos por compra de los elementos del sistema electrónico. Del mismo modo que para la Tabla 4.2, estos costos incluyen costos de adquisición, aranceles de importación y transporte. En el rubro “Varios componentes electrónicos” se incluyen los costos de elementos adicionales para la construcción de la placa de control como microcontroladores, baquelitas, reguladores, compuertas digitales, entre otros.

En total el monto por materiales asciende a 3000 dólares.

Sistema electrónico

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Costo total
1	U	Unidad de medición inercial de CH Robotics modelo CHR-6dm AHRS	255	255
1	U	Microcontrolador ATmega644P	10	10
2	U	Controlador de motores OSMC	380.2	760.4
2	U	Ventilador de motores OSMC	31.8	63.6
1	U	Programador AVR Dragon	90	90
2	U	Encoder 90 pulsos por revolución	40	80
1	U	Varios componentes electrónicos	80	80
TOTAL				1339

Tabla 4.3: Desglose de costos de materiales del sistema electrónico

4.4.2 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Este costo asciende al monto de 300 dólares.

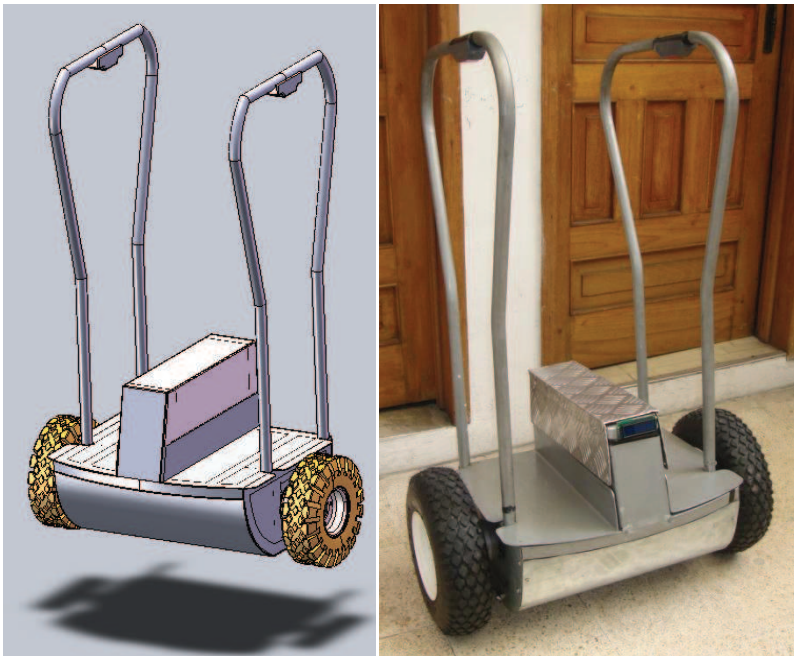


Figura 4.5: Prototipo **a)** Solidworks **b)** Real

4.4.3 COSTO DE INGENIERÍA

Para la elaboración del prototipo se ha trabajado durante 7 meses, durante las cuales se ha trabajado entre 4 y 5 horas diarias. Si se considera un salario de 300 dólares mensuales por persona, el costo de mano de obra invertido en investigación y desarrollo es de 4200 dólares.

En resumen se tiene:

Costo de materiales	3000
Costo de construcción del prototipo	300
Costo de ingeniería	4200
COSTO TOTAL	**7500**

Tabla 4.4: Resumen de costos aproximados de construcción del prototipo

Como punto de comparación se toma el costo de un vehículo Segway comercial i2, que es el más económico de la gama. Su costo es de 7700 dólares en Estados Unidos y de 7700 Euros en Europa [44].

Comparando estos precios se puede ver que para ser un prototipo ha resultado bastante económico. Si se analizan los costos con producción en masa, se verá mucho más reducido el costo de producción del vehículo, ya que la fabricación será en menor tiempo, ya no se requiere ingenieros, sino técnicos para la construcción; ya no se requiere realizar investigación porque ya está realizada; en economías de escala los elementos para construcción son más baratos. Lo que sí deberá mejorarse es la tecnología de las baterías para darle mayor tiempo de autonomía al vehículo.

Por consiguiente, la posibilidad de construcción de estos vehículos a gran escala para su uso en el país puede ser una idea económicamente viable.

4.8 VEHÍCULO ELÉCTRICO UNIPERSONAL DE UN EJE TERMINADO

Figura 4.6: Vehículo en funcionamiento

4.9 VIDEO [45]

CAPITULO 5

CONLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se logró diseñar satisfactoriamente el control de estabilidad y darle al vehículo la funcionalidad deseada, de modo que una persona sea capaz de trasladarse de un lugar a otro sin mayor dificultad. Uno de los principales aciertos fue el diseñar y construir el vehículo de forma biocompatible, es decir, en lugar de tener un volante giratorio, se dotó al vehículo de fuertes apoyos laterales, que hacen sentir mucho más segura a la persona que conduce; todo esto a partir del modelo de andador ortopédico para personas mayores de edad con dificultades para caminar.

Figura 5.1: Andador ortopédico para ancianos

El complemento fundamental a la parte electrónica en el desarrollo e implementación del vehículo, es el sistema mecánico, que brinda robustez al sistema. Gracias a él fue posible dar mayor seguridad al pasajero mediante los soportes laterales ergonómicos; tener una plataforma fija sobre la cual montar los sensores inerciales de medición de ángulo y velocidad; distribuir de forma adecuada los elementos como son baterías, controladores, motores y sensores;

tener un buen acople entre motores y llantas; proteger a los diferentes elementos contra golpes; y construir un vehículo con un modelo estético. Fue importante invertir el tiempo suficiente en investigación y desarrollo del prototipo, para disminuir los problemas en fases posteriores.

De forma general, la selección de los componentes de medición e instrumentación "sensores" fue acertada, ya que permitió una medición garantizada y un cómodo manejo de las diferentes variables del vector de estado, a saber: posición angular, velocidad angular y velocidad lineal. Cabe mencionar que la IMU seleccionada es el corazón del vehículo, ya que sus mediciones son los parámetros más importantes dentro del algoritmo de control. También hubiera sido posible realizar la medición con un inclinómetro o sensores individuales (giroscopio + acelerómetro), sin embargo se descartaron. Primero porque el inclinómetro que se necesitaba era de un alto costo y segundo por la capacidad de procesamiento que hubiera sido requerido para los sensores individuales sin olvidar el alto precio.

Por el contrario, la IMU presenta muchas ventajas, como son: su precisión, la posibilidad de calibrar su estimación e interfaz de comunicación que elimina problemas de ruido y de trabajar con sistemas lineales y no lineales.

En términos del control implementado, se realizó la modelación del sistema y la simulación del control mediante herramientas computacionales como MATLAB y SOLIDWORKS; sin embargo, en la práctica fue necesario realizar mejoras en la calibración de los parámetros técnicamente en base al comportamiento observado; lo que demuestra que a pesar de desarrollar un modelo lo más cercano posible al real, es necesaria la calibración de forma experimental en base al comportamiento real del vehículo.

Realmente en lo referente a la autonomía del vehículo (duración de las baterías), se esperaban los mismos resultados; es posible movilizarse durante una media hora sin problemas, circulando por espacios planos o con pendientes, de forma rápida o lenta. En general podría hablarse de unos 6 a 8 km de autonomía, con una pendiente máxima de 20°.

La gran mayoría de sistemas del mundo real son sistemas continuos, sin embargo cuando se desea controlarlos, deben realizarse mediciones y tomarse acciones de control que tardan cierto tiempo, por tanto el control se realiza de forma discreta. Durante el diseño de este prototipo se realizó el análisis, programación del controlador y pruebas como si fuese un sistema continuo, se obtuvo resultados satisfactorios, por lo que no se justifica realizar un análisis del sistema como un sistema discreto.

En el primer capítulo se obtuvo el modelo de la planta en variables de estado considerando el rozamiento existente con el piso, sin embargo el modelo de Simulink no lo considera, debido a esto el ajuste de calibración en la constante Kp del controlador PID es diferente al obtenido en la simulación. Esto justifica la diferencia de la constante teórica con la constante práctica.

Dadas las características de este vehículo, se consideraría apropiado para el transporte de personal de control en fábricas, supermercados, centros comerciales, turismo en algunos lugares abiertos y cerrados.

En base a pruebas realizadas, el prototipo es capaz de transportar a una persona cuyo peso este comprendido entre 50 y 90kg.

La estructura del prototipo es cerrada, para proteger los componentes de control y de potencia de factores externos como polvo y lluvia; sin embargo, no es herméticamente cerrada por cuanto se requiere la ventilación necesaria para ventilar todos los componentes internos instalados, que generan calor.

El objetivo principal del diseño y construcción de un vehículo unipersonal se ha cumplido.

5.2 RECOMENDACIONES

Existen algunas mejoras que podrían realizarse al prototipo en versiones futuras, como son dotarlo de una mejor fuente de energía, que le de mayor autonomía; desarrollar un algoritmo de control no lineal que brinde mayores prestaciones, mejorar la estabilidad y funcionalidad del vehículo, aprovechar al máximo la potencialidad del sensor inercial.

Debido a que el vehículo se adapta biomecánicamente a la persona, y su diseño tuvo como referencia un andador para personas de edad avanzada con dificultades para caminar, podría ser empleado por ellos para movilizarse de un lugar a otro sin mucho esfuerzo y mayor comodidad. Adicionalmente podría incluirse un soporte para sentarse, que facilitaría la movilización de las personas mayores.

Sería interesante realizar un estudio del caso en el que se emplease sistemas discretos para el análisis y control del prototipo, con el propósito de comparar los resultados y determinar si un controlador discreto controla mejor al vehículo, que un controlador continuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ref. 1 Wikipedia, “Historia del desarrollo del Segway”, 2010, www.wikipedia.org/wiki/Segway_Personal_transporter

Ref. 2 SEGWAY, “Modelos comercializados”, 2010, www.segway.com/individual/models/index.php

Ref. 3 SEGWAY, “Product Brochure”, 2010, www.segway.com/downloads/pdfs/brochures/2008_Product.pdf

Ref. 4 SEGWAY, “Líder en el transporte personal verde”, 2010, www.segway.com/about-segway/

Ref. 5 Wikipedia, “Definición de centro de gravedad”, www.es.wikipedia.org/wiki/Centro_de_gravedad

Ref. 6 SIRA-RAMIREZ, “CONTROL DE SISTEMAS NO LINEALES”, linealizacion, extendida, exacta. Mayo 2004

Ref. 7 Burbano, Patricio, “Materia de Sistemas de Control Automático”, Ecuador, 2007

Ref. 8 Wikipedia, “Filtro Kalman”, www.en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter

Ref. 9 Burbano, Patricio, “Materia de Control Moderno”, Ecuador, 2009

Ref. 10 Prieto, Alberto; Viguria, Antidio; Vela, Benito; Fiacchini, Mirko; Cano, Ramón, “PPCarro: Vehículo móvil basado en péndulo invertido”, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, España, 2004,

www.esi2.us.es/~rubio/DocumentoTecnico.pdf

Ref. 11 MUCHOTRASTO, “Creando nuestro robot móvil”, www.muchotrasto.com/TiposDePlataformas.php

Ref. 12 “Cinemática de robots móviles”, www.uhu.es/omar_sanchez/Omar%27s%20Resources/cinematicavehiculos.pdf

Ref. 13 Universidad de Sevilla, “Sistemas de locomoción de robots móviles”, España, www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iaei/LOC_MOV.pdf

Ref. 14 Centro nacional de microelectrónica, “Péndulo invertido”, España, www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/FLEB/main/main422.htm

Ref. 15 Sociedad Internacional de Automatismo, “Construcción de un pequeño Segway”,2009, www.isa.uniovi.es/ISAwiki/index.php/Construcci%C3%B3n_de_un_peque%C3%B1o_Segway

Ref. 16 Burbano, Patricio “Materia de Modelación y Simulación”, 2010

Ref. 17 MUCHOTRASTO, “Sistema mecánico”, www.muchotrasto.com/SistemaMecanico.php

Ref. 18 Ledesma, Bolívar, “Materia de Control Electrónico Industrial”, 2010

Ref. 19 NPC Robotics, “Batería código NPC-B1412”, Estados Unidos www.npcrobotics.com/products/viewprod.asp?prod=17&cat=15&mode=gfx

Ref. 20 MK Powered, “Batería modelo ES17-12”, Estados Unidos, www.mkbattery.com/images/ES17-12.pdf

Ref. 21 NPC Robotics, “Distribuidos de dispositivos robóticos”, Estados Unidos, www.npcrobotics.com

Ref. 22 Wikipedia, “Coeficientes de fricción”, www.es.wikipedia.org/wiki/Fricci%C3%B3n#Valores_de_los_coeficientes_de_fricci.C3.B3n

Ref. 23 MSc. Pablo Rivera Argoti, “Motores DC”, Control de Máquinas Eléctricas, Página 55, Ecuador.

Ref. 24 NPC robotics, “Motor NPC-T64“, Estados Unidos www.npcrobotics.com/products/viewprod.asp?prod=42&cat=20&mode=gfx

Ref. 25 Wikipedia, ”Unidad de medida inercial IMU”, www.en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit

Ref. 26 Anexo 4: Hoja de Datos Sensor IMU

Ref. 27 Duarte Mermoud, Manuel, “Diseño e implementación de vehículo autobalanceado sobre dos ruedas”, Universidad de Chile, Chile, 2009, www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/moreno_l/sources/moreno_l.pdf

Ref. 28 Robot Power, “Controlador de Motor de fuente abierta”, Estados Unidos,

www.robotpower.com/products/osmc_info.html

Ref. 29 Vex Robotics, “Encoder óptico de cuadratura”, Estados Unidos

www.content.vexrobotics.com/docs/inventors-guide/vex-robotics-optical-shaft-quadrature- encoder-inst.pdf

Ref. 30 Anexo D: Hoja de datos Atmega644P y Atmega8

Ref. 31 Anexo C: Diagramas de la tarjeta de control

Ref. 32 ATMEL, “Hoja de datos atmega644P”

Ref. 33 SEGWAY, “Guía de Interface de la Plataforma Robótica Móvil”, 2010 Página 13 – Referencia de conversión de datos, www.wikiri.upc.es/images/3/3c/Interface_Guide_for_Segway_RMP.pdf

Ref. 34 Anexo 4 Hoja de datos LM317

Ref. 35 Anexo 4: Hoja de datos de controlador OSMC (Esquemático)

Ref. 36 ATMEL, “Ayuda de CodeVIsionAVR”

Ref. 37 ATMEL AVR, “Hoja de datos AVRdragon”, www.courses.cit.cornell.edu/ee476/AtmelStuff/dragon.pdf

Ref. 38 CHRobotics, “Software AHRS Interface para calibración del sensor CHR-6dm AHRS”, Estados Unidos, www.chrobotics.com/index.php?main_page=page&id=3

Ref. 39 VER ANEXO D: Hoja de datos del sensor de inclinación IMU

Ref. 40 HW server, “Obtención del software BRAY”, www.hw-server.com/software/termv19b.html

Ref. 41 MathWorks, “Software Simmechanics”, www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/smlink/rn/bq9wxlz.html

Ref. 42 CAD: Computer Aided Design

Ref. 43 Nombre del vehículo comercial, en el cual se inspira este prototipo

Ref. 44 SEGWAY, www.segway.com/configurator

Ref. 45 El video se encuentra en el CD de anexos

Otras referencias utilizadas:

Ref. 46 Motor y caja reductora de Banebots, www.banebots.com

Ref. 47 DC Motor 500 Watts, http://www.fun-components.com/index.php?route=product/product&path=39&product_id=62

ANEXOS