

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO BALANCEADO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Pereira R., Erika G.
Rivera L., Carlos E.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO BALANCEADO

Tutor Académico: Ing. Pedro Pinto

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Pereira R., Erika G.
Rivera L., Carlos E.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2012

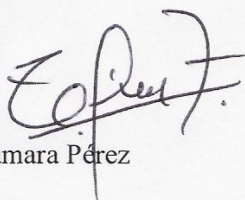
CONTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 12 de noviembre de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Carlos Eduardo Rivera López y Erika Gabriela Pereira Ruiz, titulado:

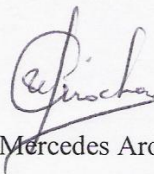
“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO BALANCEADO”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Electrónica y Control, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO** y obtuvo **Mención Honorífica**.



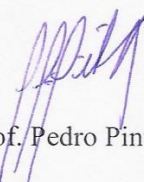
Prof. Tamara Pérez

Jurado



Prof. Mercedes Arocha

Jurado

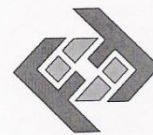


Prof. Pedro Pinto

Profesora guía



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
DPTO. DE ELECTRONICA, COMPUTACION Y CONTROL



ACTA

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Central de Venezuela para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres: **PEREIRA, ERIKA**, cédula de identidad N° 18.209.49 y **RIVERA, CARLOS**, cédula de identidad N° 18.466.426, bajo el título “**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN VEHICULO AUTO BALANCEADO**”; a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de Ingeniero Electricista, dejan constancia de lo siguiente:

Considerando que el Trabajo Especial de Grado presentado y defendido por los Bachilleres en referencia, presenta un grado de originalidad y excelencia tanto en su contenido como en su presentación formal que lo convierte en una fuente referencial útil, acuerda por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORIFICA**, al Trabajo Especial de Grado antes mencionado.

En Caracas, doce (12) de noviembre de 2012.

PROF. MERCEDES AROCHA
Jurado

PROF. TAMARA PEREZ
Jurado

PROF. PEDRO PINTO
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres Carmen Ruiz y Edgar Pereira.

A mis hermanos Verónica Pereira, Jessica Pereira y Eduar Pereira.

A mi tío Samuel Ruiz.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela.

Erika Pereira.

A mis padres Fernanda López y Moisés Rivera.

A mis hermanos José Rondón, Ronald Rondón, Johanly Rondón y Moisés Rivera.

A mis familiares Alexis Robles, Nancy Castro y Rafael Acevedo.

A la familia Hernández Peña y Marcano Laya.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela.

Carlos Rivera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, ayudante universal.

Al Profesor Pedro Pinto, por permitir el desarrollo de este proyecto y nuestra participación en él, así como por sus recomendaciones y consejos.

Al Profesor Servando Álvarez, por su gran apoyo a lo largo de la carrera y durante el desarrollo de este proyecto, y por el aporte de sus conocimientos que hicieron más fácil el proceso de diseño del proyecto.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica que contribuyeron con nuestro aprendizaje y crecimiento académico.

Al señor Rómulo técnico de soldadura de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

A la familia Hernández Peña, Miguel Graterol, Leonardo Marcano, Gregory Molina, por facilitar equipos, herramientas, espacios y hacer más ameno el camino recorrido durante el desarrollo de este proyecto.

Especial agradecimientos a nuestros familiares, Fernanda López, Carmen Ruiz, Ronald Rondón y Rafael Acevedo por su colaboración activa, motivación y sobre todo por su apoyo incondicional en todo momento.

A todas aquellas personas que aportaron su grano de arena, directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto e hicieron posible que se culminara con éxito.

**Pereira R., Erika G.;
Rivera L., Carlos E.**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO BALANCEADO

Tutor académico: Ing. Pedro Pinto. Tesis. Caracas. U.C.V.. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica. 2012. 102 h + anexos

Palabras claves: Vehículo auto balanceado; Péndulo invertido; Puente H; Motores de corriente continua; Controladores PID, Filtro complementario; Acelerómetro; Giroscopio.

Resumen. El desplazamiento de las personas constituye un factor importante en el desarrollo de actividades laborales, de comercio y de seguridad. Existe una amplia gama de opciones al momento de elegir como desplazarse de un punto a otro, sin embargo, problemas como la congestión vehicular y las emisiones contaminantes de los vehículos de combustión interna, atacan a diario a las personas que viven en los distintos espacios urbanos. Se plantea el diseño y la implementación de un vehículo eléctrico auto balanceado que proporcione una innovadora opción de transporte y un medio para desplazarse limpio, práctico, pequeño y cómodo. Para ello se realiza una investigación teórica previa, el diseño de las diferentes etapas que conforman el vehículo, el desarrollo del sistema de control y las pruebas pertinentes, para posteriormente, realizar el proceso de ensamblado y estructurar, así, el vehículo en su totalidad. El vehículo auto balanceado implementado fue sometido a diversas pruebas de funcionamiento, que comprobaron que éste puede acelerar, frenar y girar de forma aceptable, proporcionando, en términos generales, un cómodo desplazamiento del conductor.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
LISTADO DE ACRÓNIMOS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	4
2.1 MARCO TEÓRICO	4
2.1.1 Modelado teórico de un vehículo basado en el péndulo invertido	4
2.1.2 Acelerómetros	11
2.1.3 Giroscopio.....	13
2.1.4 Sensor de corriente de efecto Hall	14
2.1.5 Filtro complementario.....	15
2.1.6 Controladores: Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD) y Proporcional Integral Derivativo (PID)	20
2.1.6.1 Acción proporcional.....	21
2.1.6.2 Acción integral	21
2.1.6.3 Acción derivativa	22
2.1.7 Motor de corriente continua.....	25
2.1.7.1 Principio de funcionamiento	25
2.1.7.2 Tipos de motores según la construcción de la armadura o rotor	28
2.1.7.3 Control de motores de corriente continua	29

2.1.7.4 Modelo matemático de motores de corriente continua de imán permanente	29
2.1.8 Puente H.....	31
2.1.9 Modulación por ancho de pulso.....	34
2.1.10 Baterías	36
2.1.10.1 Principio de funcionamiento	36
2.1.10.2 Parámetros de una batería	36
2.1.10.3 Tipos de baterías según la tecnología de construcción	38
2.1.10.4 Baterías de plomo ácido	38
2.1.10.5 Carga y descarga de baterías	39
2.1.10.6 Baterías de litio fosfato de hierro (LiFePO ₄).....	40
CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	42
3.1 DEFINICIÓN DEL HARDWARE	42
3.1.1 Etapa de adquisición de datos	42
3.1.2 Etapa de control	43
3.1.3 Actuadores	43
3.1.4 Etapa de potencia	44
3.1.5 Etapa de alimentación	44
3.1.6 Interfaz	45
3.1.7 Parte mecánica	45
3.2 DEFINICIÓN DEL SOFTWARE	45
3.2.1 Calibración.....	46
3.2.2 Acondicionamiento de señales.....	46
3.2.3 Verificación del estado de las baterías.....	47
3.2.4 Sistemas de seguridad	47
3.2.5 Sistema de control.....	47
3.3 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	48
3.3.1 Adquisición de datos.....	48
3.3.1.1 Acelerómetro.....	48
3.3.1.2 Giroscopio	50
3.3.1.3 Sensor de corriente.....	52

3.3.1.4 Potenciómetro de dirección.....	52
3.3.1.5 Divisor de tensión de las baterías.....	53
3.3.2 Etapa de control	53
3.3.3 Actuadores	55
3.3.4 Etapa de potencia.....	56
3.3.5 Etapa de alimentación.....	62
3.3.6 Interfaz	64
3.3.7 Parte mecánica	67
3.4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	68
3.4.1 Calibración.....	68
3.4.2 Acondicionamiento de señales.....	69
3.4.3 Verificación del estado de las baterías.....	70
3.4.4 Sistemas de seguridad.....	71
3.4.4.1 Caso 1: Ángulo crítico	71
3.4.4.2 Caso 2: Sobrecorriente	71
3.4.5 Sistema de control.....	72
CAPÍTULO IV PRUEBAS Y RESULTADOS	79
4.1 PRUEBAS DE MEDICIÓN.....	79
4.1.1 Pruebas iniciales	79
4.1.2 Medición del ángulo de inclinación.....	80
4.1.3 Funcionamiento del filtro complementario.....	81
4.1.4 Sistema de seguridad de ángulo crítico y de sobrecorriente	86
4.1.5 Pruebas de la etapa de potencia	87
4.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	93
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
BIBLIOGRAFÍAS	99
ANEXOS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema general de un vehículo auto balanceado.	6
Figura 2.2. Analogía mecánica de un acelerómetro.	12
Figura 2.3. Principio de funcionamiento de un acelerómetro capacitivo.	13
Figura 2.4. Funcionamiento de un giroscopio de vibración de Coriolis.	14
Figura 2.5. Esquema gráfico del filtro complementario en un sistema de dos entradas.	17
Figura 2.6. Filtro complementario para estimar un ángulo de inclinación a partir de un giroscopio y un acelerómetro.	18
Figura 2.7. (a) Partes de un motor CC, (b) Circuito equivalente de un motor CC	26
Figura 2.8. Esquema general de un puente H.	32
Figura 2.9. Estado 1 del puente H: giro en un sentido	33
Figura 2.10. Estado 2 del puente H: giro en el otro sentido.	33
Figura 2.11. Estado 3 del puente H: frenado.	33
Figura 2.12. Estados que debe evitarse en un puente H.	34
Figura 3.1 Bloques funcionales de un vehículo auto balanceado	42
Figura 3.2. Medición del acelerómetro en el eje X.	50
Figura 3.3 Divisor de tensión resistivo	53
Figura 3.4. Conexión típica del controlador IR2184.	58
Figura 3.5. Diagrama esquemático parte 1 de la etapa de control	65
Figura 3.6. Diagrama esquemático parte 2 de la etapa de control	66
Figura 3.7. Diagrama esquemático de la etapa de potencia	67
Figura 3.8. Dimensiones del vehículo. (a) Vista frontal. (b) Base donde reposa el conductor.	68
Figura 3.9. Diagrama de bloques del sistema de control	75
Figura 3.10. Configuración inicial microcontrolador principal	76
Figura 3.11. Monitoreo de la carga restante de las baterías (microcontrolador principal)	77

Figura 3.12. Acondicionamiento de señales, sistema de control y sistema de seguridad de ángulo crítico (microcontrolador principal)	77
Figura 3.13. Sistema de seguridad sobrecorriente (microcontrolador principal).....	78
Figura 3.14. Monitoreo de corriente (microcontrolador secundario).....	78
Figura 4.1. Ángulo estimado utilizando la señal del acelerómetro	83
Figura 4.2. Ángulo estimado utilizando la señal del acelerómetro y aplicando un filtro pasabajo.....	83
Figura 4.3. Ángulo estimado utilizando la señal del giroscopio	84
Figura 4.4. Ángulo estimado utilizando la señal del giroscopio y aplicando un filtro pasaalta.....	85
Figura 4.5. Ángulo estimado aplicando el filtro complementario	85
Figura 4.6. Salida PWM del microcontrolador principal.....	87
Figura 4.7. Salida de la compuerta NOR	88
Figura 4.8. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H.....	88
Figura 4.9. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H.....	88
Figura 4.10. Señal en el motor	89
Figura 4.11. Salida PWM del microcontrolador principal.....	89
Figura 4.12. Salida de las compuerta NOR.....	89
Figura 4.13. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H.....	90
Figura 4.14. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H.....	90
Figura 4.15. Señal en el motor	90
Figura 4.16. Salida PWM del microcontrolador	91
Figura 4.17. Salida de la compuerta NOR	91
Figura 4.18. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H.....	91
Figura 4.19. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H.....	92
Figura 4.20. Señal en el motor	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación general de los controladores P, PI y PD.....	24
Tabla 3.1 Tabla de verdad para las salidas de las compuertas NOR.....	54
Tabla 3.2. Especificaciones del motor de corriente continua.....	55
Tabla 4.1. Medición del ángulo usando un transportador y la salida del filtro complementario.....	80

LISTADO DE ACRÓNIMOS

ADC: Analog to Digital Converter (convertidor analógico-digital).

AGM: Absorbed Glass Mat (separador de vidrio absorbente).

BJT: Bipolar Junction Transistor (transistor de unión bipolar).

CC: Corriente continua.

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor (transistor bipolar de compuerta aislada).

LED: Light Emitting Diode (diodo emisor de luz).

MEMS: Microelectromechanical systems (sistemas microelectromecánicos).

MOSFET: Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor (transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor).

PD: Controlador proporcional derivativo

PI: Controlador proporcional integral

PID: Control proporcional integral derivativo

PWM: Pulse Width Modulation (modulación por ancho de pulso).

SLA: Sealed Lead Acid (ácido de plomo sellado).

TTL: Transistor Transistor Logic (lógica transistor a transistor).

VRLA: Valve Regulated Lead Acid (ácido de plomo de válvula regulada).

INTRODUCCIÓN

El desplazamiento de un lugar a otro forma parte de nuestra vida cotidiana, de nuestro día a día.

Un vehículo auto balanceado de dos ruedas proporciona un medio de transporte eléctrico, ligero, innovador, de fácil manejo, limpio, de mantenimiento poco complicado.

Por estas razones, en el presente proyecto se plantea el diseño de un vehículo auto-balanceado, que funcione utilizando los principios del péndulo invertido y que permita mejorar la eficiencia laboral de empleados de determinadas empresas, como por ejemplo, de agentes de seguridad y que, en general, proporcione un cómodo desplazamiento de las personas y genere el menor impacto ambiental posible.

El trabajo se realizará en dos etapas simultáneas que serán ejecutadas por los bachilleres Erika Pereira y Carlos Rivera.

Los motivos que condujeron al planteamiento del presente proyecto se presentan en el capítulo I del presente escrito. Por otro lado, para lograr implementar el equipo se realizó una investigación teórica profunda, la cual se plasmará en el capítulo II. Una vez realizados los primeros diseños, que permitieron seleccionar los componentes más adecuados para el equipo, se elaboró la estructura mecánica del vehículo; dicho proceso de diseño se detallará en el capítulo III. Luego, se ensambló la citada estructura mecánica junto con las diferentes etapas del equipo para estructurar el vehículo en su totalidad. Posteriormente, se realizaron las diferentes pruebas de medición y de funcionamiento, cuyo procedimiento y resultados se presentarán en el capítulo IV.

Finalmente, se exponen las conclusiones que se derivan de este proyecto y se sugieren algunas recomendaciones que pueden servir de punto de partida para futuros trabajos relacionados.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desplazamiento de las personas que hacen vida en las ciudades y demás espacios urbanos, se ha constituido como una de las principales necesidades en el desarrollo y progreso de actividades laborales, de seguridad y de comercio.

Por otro lado, una gran parte de la contaminación urbana proviene del transporte y de sus emisiones nocivas. Obviamente, la contaminación es uno de los principales problemas ambientales que se tienen en la actualidad, razón por la cual en la sociedad existe la necesidad, cada vez mayor, de construir medios de transportes ecológicos y así obtener una movilidad sostenible. En términos generales, se busca la proliferación de vehículos con pocas emisiones contaminantes. Una gran opción es la fabricación de vehículos eléctricos, que constituyen un medio de transporte limpio.

Otro de los factores que afecta el desplazamiento de las personas en los espacios urbanos es la congestión vehicular, al punto de convertirse para la población, en un problema realmente angustiante. Es por esto que, en la actualidad, existe un enorme auge de fabricar vehículos pequeños.

Por otro lado, el tema de la movilidad urbana involucra de una forma bastante particular a agentes de seguridad, mensajeros, entre otros, cuya actividad laboral, propiamente dicha, consiste en el desplazamiento o vigilancia de un área determinada.

Un vehículo auto balanceado de dos ruedas, ligero e innovador, proporciona una opción alternativa, cómoda, rápida y limpia de desplazarse. Ofrece una mejor visión del panorama y un desplazamiento relativamente rápido. Su manejo resulta bastante intuitivo, cuenta con un sistema de control que le permite captar y responder a las variaciones de posturas del conductor, de forma que si éste se inclina hacia

adelante, el vehículo también lo hará, de igual forma si la inclinación es hacia los lados o hacia atrás. En pocas palabras, el equipo se mueve al unísono con la persona que lo conduce, casi como si fuera una extensión de su cuerpo. De igual forma, permite estacionar cómoda y fácilmente y evitar la congestión de tránsito.

Estos vehículos no requieren el uso de combustible y ofrecen un servicio con un gran respeto al medio ambiente, es un medio de transporte limpio, razón por la cual puede decirse que mantiene el equilibrio incluso del medio ambiente.

Por todas estas razones, y por el aprendizaje teórico y práctico que rodea el desarrollo de este tipo de vehículos, en el presente proyecto se plantea el diseño de un vehículo eléctrico, de dos ruedas y auto balanceado, que opere utilizando los principios del péndulo invertido.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un vehículo auto balanceado.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el acondicionamiento de las señales en cada uno de los sensores para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.
- Definir e implementar la etapa de potencia, que interactuará con los motores del vehículo.
- Diseñar e implementar el sistema de control que gobierna al vehículo.
- Implementar el proceso de monitoreo de la carga de las baterías, para indicar al conductor el tiempo que queda disponible para trasladarse.
- Definir el tipo de baterías que utilizará el vehículo, garantizando un proceso de carga rápido y eficiente.
- Implementar sistemas de seguridad que permitan resguardar tanto al conductor como al vehículo.
- Realizar el manual del vehículo.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Modelado teórico de un vehículo basado en el péndulo invertido

El péndulo invertido es un sistema complejo no lineal ampliamente estudiado y analizado en el ámbito de los sistemas de control. Este tipo de sistema tiene una variedad de aplicaciones en el mundo de la robótica como por ejemplo en el estudio de la postura humana, además, tiene aplicaciones en el desarrollo de vehículos eléctricos, en el ámbito militar como para el control de misiles e incluso en aplicaciones aeroespaciales como en el vuelo vertical de cohetes. En este sentido se tiene que una de las aplicaciones que está en apogeo en la actualidad es el desarrollo de vehículos eléctricos auto balanceados.

Un vehículo auto-balanceado es un medio de transporte eléctrico, ligero y limpio que consiste en un sistema de péndulo invertido, al que se le aplica un sistema de control, el cual hace que el vehículo se desplace debido a un proceso de búsqueda de equilibrio.

En el desarrollo de este tipo de vehículos se ven involucradas una gran cantidad de leyes físicas y diversos principios matemáticos, los cuales se presentan a continuación.

A través de los conocimientos propios y del análisis de algunos trabajos relacionados con el desarrollo de equipos basados en el principio del péndulo invertido, entre los que destacan el trabajo de maestría del Ingeniero Vicente Madero [1], se plantea el desarrollo matemático para modelar un vehículo auto balanceado.

Para describir un sistema mecánico se pueden utilizar diversas Leyes Físicas y ecuaciones matemáticas, entre ellas se encuentran las ecuaciones de Euler Lagrange

las cuales permiten describir un sistema a través de coordenadas generalizadas. Las ecuaciones de Euler Lagrange se definen de la siguiente forma [1]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial p_i} = \sum_j f_j \quad (1)$$

Donde: **P_i** : Coordenadas generalizadas.

P_i' : Derivadas de las coordenadas generalizadas P_i .

L : Lagrangiano del sistema mecánico.

F_i : Fuerzas y pares externos aplicados.

Por otro lado, se tiene que el término L , que recibe el nombre de Lagrangiano del sistema, viene dado por la ecuación (2):

$$L(\theta(t), \omega(t)) = E_c - E_p \quad (2)$$

$$E_c = E_{cr} + E_{cp} \quad (3)$$

Dónde:

E_c : Energía cinética

E_p : Energía potencial

E_{cr} : Energía cinética de las ruedas

E_{cp} : Energía cinética del péndulo

Para el caso del vehículo basado en el principio del péndulo invertido se plantean las siguientes coordenadas:

$$P = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$P' = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$$

Dónde: θ : Ángulo de inclinación del péndulo.

$\dot{\theta}$: Velocidad angular del péndulo.

ω : Ángulo girado por el eje de los motores.

$\dot{\omega}$: Velocidad del eje de los motores.

En la figura 2.1 se representa el esquema general de un vehículo basado en el principio del péndulo invertido.

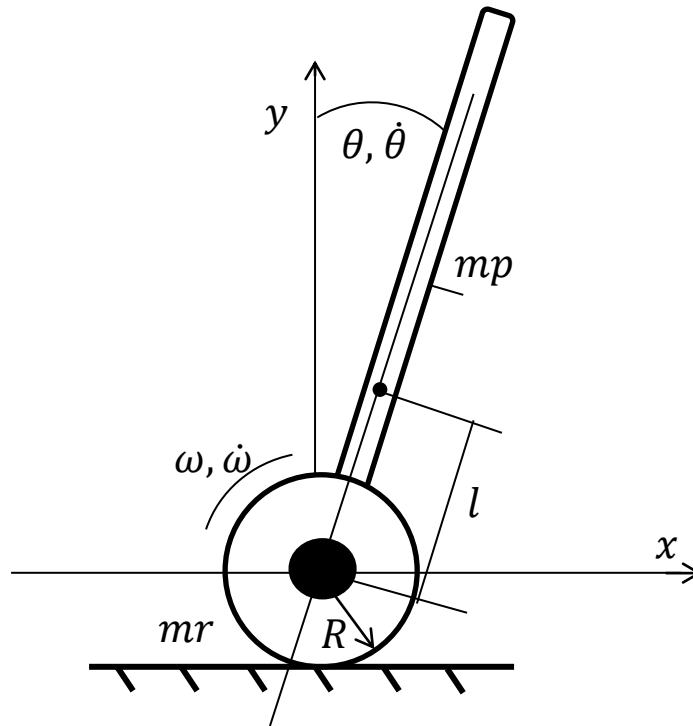


Figura 2.1. Esquema general de un vehículo auto balaceado.

θ : Ángulo de inclinación del péndulo.

$\dot{\theta}$: Velocidad angular del péndulo.

m_p : Masa del péndulo

l : Longitud del centro de masa del péndulo al eje de los motores

ω : Ángulo girado por el eje de los motores.

$\dot{\omega}$: Velocidad del eje de los motores.

mr : Masa de las ruedas

R : Radio de las ruedas

Se debe mencionar que para el desarrollo matemático siguiente, se utilizarán las siguientes variables:

E_{tras} : Energía cinética de traslación.

E_{rot} : Energía cinética de rotación.

x_{cm} : Coordenada X del centro de masa del péndulo.

y_{cm} : Coordenada Y del centro de masa del péndulo.

I_r : Momento de Inercia del centro de las ruedas.

I_p : Momento de Inercia del péndulo (en el eje de los motores).

La energía cinética total es la suma de la energía cinética del péndulo y la energía cinética de las ruedas [1]:

$$E_c = E_{cr} + E_{cp} \quad (4)$$

La energía cinética de las ruedas viene dada por la ecuación (5):

$$E_{cr} = E_{tras} + E_{rot} \quad (5)$$

Sustituyendo en la ecuación (5) se tiene:

$$\begin{aligned} E_{cr} &= \frac{1}{2} \cdot mr \cdot v + \frac{1}{2} \cdot I_r \cdot \dot{\omega}^2 \\ E_{cr} &= \frac{1}{2} \cdot mr \cdot (R \cdot \dot{\omega})^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot mr \cdot R^2 \right) \cdot \dot{\omega}^2 \\ E_{cr} &= \frac{3}{4} \cdot mr \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Las coordenadas del centro de masa del péndulo vienen dadas por las ecuaciones (7) y (8):

$$x_{cm} = l \cdot \text{sen}(\theta) + R \cdot \omega \quad (7)$$

$$y_{cm} = l \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

Derivando respecto al tiempo las ecuaciones (7) y (8) se obtiene la velocidad del centro de masa del péndulo:

$$x\dot{c}m = l \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\theta) + R \cdot \dot{\omega} \quad (9)$$

$$y\dot{c}m = -l \cdot \dot{\theta} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (10)$$

La energía cinética del péndulo E_{cp} se calcula según la ecuación (11):

$$E_{cp} = \frac{1}{2} \cdot mp \cdot (x\dot{c}m^2 + y\dot{c}m^2) + \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación (11) se tiene:

$$\begin{aligned} E_{cp} &= \frac{1}{2} \cdot mp \cdot [l^2 \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \cos^2 \theta + R^2 \cdot \dot{\omega}^2 + 2 \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \cos \theta + l^2 \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \text{sen}^2 \theta] + \\ &\quad \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 \\ E_{cp} &= \frac{1}{2} \cdot mp \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot mp \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 + mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 \quad (12) \end{aligned}$$

Por lo tanto, al sustituir las ecuaciones (6) y (12) en la ecuación (4) se obtiene:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{3}{4} \cdot mr \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 + \frac{1}{2} \cdot mp \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot mp \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 + mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \cos \theta + \\ &\quad \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 \\ E_c &= \left(\frac{1}{2} \cdot mp + \frac{3}{4} \cdot mr \right) \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 + \frac{1}{2} \cdot mp \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 + mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \cos \theta \quad (13) \end{aligned}$$

Para el cálculo de la energía potencial se tomara el eje de giro como el eje de giro de las ruedas, de forma que esta queda definida según la ecuación (14):

$$Ep = mp \cdot g \cdot l \cdot \cos\theta \quad (14)$$

Sustituyendo las ecuaciones (13) y (14) en la ecuación (2) se define el Lagrangiano L de la siguiente forma [1]:

$$L = \frac{1}{2} \cdot Ip \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot mp \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}^2 + mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \cos\theta + \left(\frac{1}{2} \cdot mp + \frac{3}{4} \cdot mr \right) \cdot R^2 \cdot \dot{\omega}^2 - mp \cdot g \cdot l \cdot \cos\theta \quad (15)$$

Para aplicar las fórmulas de Euler Lagrange se plantean las siguientes expresiones:

Derivando la ecuación (15) respecto a θ y respecto a ω se obtienen las ecuaciones (16) y (17):

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\omega} \cdot \sin\theta + mp \cdot g \cdot l \cdot \sin\theta \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \quad (17)$$

Derivando la ecuación (15) respecto a $\dot{\theta}$ y respecto a $\dot{\omega}$ se obtienen las ecuaciones (18) y (19):

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = Ip \cdot \dot{\theta} + mp \cdot l^2 \cdot \dot{\theta} + mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\omega} \cdot \cos\theta \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} = mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta + \left(mp + \frac{3}{2} \cdot mr \right) \cdot R^2 \cdot \dot{\omega} \quad (19)$$

Derivando las ecuaciones (18) y (19) respecto al tiempo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = Ip \cdot \ddot{\theta} + mp \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta} + mp \cdot l \cdot R \cdot \ddot{\omega} \cdot \cos\theta - mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} \right) = mp \cdot l \cdot R \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos\theta - mp \cdot l \cdot R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin\theta + \left(mp + \frac{3}{2} \cdot mr \right) \cdot R^2 \cdot \ddot{\omega} \quad (21)$$

En un vehículo auto balanceado la fuerza externa no conservativa que actúa es la fuerza de roce del motor, que se opone al giro del eje de este y el único par externo es el del motor. Como se dijo anteriormente, se toma el eje de giro del

péndulo igual al eje de giro de las ruedas, por ende, tanto la fuerza de roce como el par del motor afectan tanto al péndulo cómo a las ruedas, sólo que en sentido contrario. Teniendo esta información se pueden plantear las ecuaciones de Euler Lagrange de la siguiente forma:

$$Fr = -kr.\dot{\omega} \quad (22)$$

Sustituyendo las ecuaciones (16), (17), (20), (21) y (22) en la ecuación (1) se obtiene:

$$mp.l.R.\ddot{\theta}.cos\theta - mp.l.R.\dot{\theta}^2.sen\theta + \left(mp + \frac{3}{2}.mr\right).R^2.\ddot{\omega} = \tau - kr.\dot{\omega} \quad (23)$$

$$(Ip + mp.l^2).\ddot{\theta} + mp.l.R.\ddot{\omega}.cos\theta - mp.g.l.sen\theta = -\tau + kr.\dot{\omega} \quad (24)$$

Dónde: τ : Par del motor

Fr : Fuerza de roce del motor

kr : Coeficiente de fricción

De forma que las ecuaciones (23) y (24) definen el modelo matemático del sistema.

Para plantear la representación en variables de estados del sistema se plantea:

$$x_0 = \theta \quad x_1 = \dot{\theta} \quad x_2 = \omega \quad x_3 = \dot{\omega}$$

Además, para simplificar el manejo algebraico se proponen las siguientes constantes:

$$A = mp.l.R \quad B = Ip + mp.l^2 \quad C = mp.g.l \quad D = \left(mp + \frac{3}{2}.mr\right).R^2$$

Se tiene entonces:

$$\dot{x}_0 = x_1$$

$$\dot{x}_1 = \frac{A \cdot \cos x_0 \cdot (\sin x_0 \cdot x_1^2 - kr \cdot x_3) - D \cdot C \cdot \sin x_0 - kr \cdot x_3 + (1 + A \cdot \cos x_0) \cdot \tau}{A^2 \cdot \cos^2 x_0 - D \cdot B}$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & ((A^2 \cdot \cos^2 x_0 - D \cdot B) \cdot (kr \cdot x_3 + C \cdot \sin x_0 + \tau) - B \cdot A \cos x_0 \cdot (\sin x_0 \cdot x_1^2 + \tau \\ & - kr \cdot x_3) + B \cdot C \cdot D \cdot \sin x_0 + B \cdot kr \cdot x_3 - B \cdot \tau) / (A \cdot \cos x_0 (A^2 \cdot \cos^2 x_0 \\ & - D \cdot B)) \end{aligned}$$

A simple vista se observa que el sistema es indudablemente no lineal, lo que dificulta el desarrollo de sistemas de control. No obstante, se pueden aplicar diversas técnicas para linealizar el sistema alrededor del punto de equilibrio ($\theta \cong 0^\circ$) según sea conveniente.

Al mismo tiempo, se aprecia que el sistema se puede esquematizar como un sistema formado por dos bloques, la planta y el actuador, de manera que las variables de estado x_0 y x_1 , las cuales representan el ángulo y la velocidad del péndulo invertido, constituyen la dinámica de la planta y las variables de estado x_2 y x_3 , que representan el ángulo y la velocidad de las ruedas, constituyen la dinámica de control.

2.1.2 Acelerómetros

Los acelerómetros son dispositivos capaces de medir la aceleración a la que son sometidos.

Existe una gran variedad de tipos de acelerómetros entre ellos se pueden mencionar los piezoeléctricos, los capacitivos, los de inducción magnética, los ópticos, los de efecto hall, entre otros.

Para el desarrollo del vehículo, el acelerómetro que se utiliza es el de tipo capacitivo. El principio de funcionamiento de este tipo de acelerómetro es bastante sencillo, si se hace una analogía con la física mecánica, este consiste, básicamente, en una masa suspendida que se puede mover en una dimensión entre dos resortes fijos como se muestra en la figura 2.2.

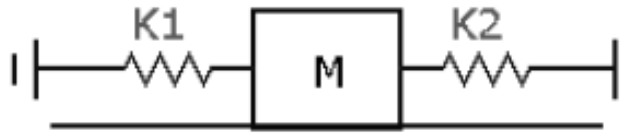


Figura 2.2. Analogía mecánica de un acelerómetro.

Si el conjunto K1, K2 y M se mueve a velocidad constante en cualquier sentido (en este caso izquierda o derecha), los resortes no sufrirán deformación alguna, en cambio si el conjunto sufre una aceleración por ejemplo hacia la derecha, la inercia de la masa causaría que el resorte K2 se extienda, mientras que el resorte K1 se comprima, esto ocurre hasta que el conjunto deje de sufrir una aceleración. Entonces, básicamente, con la información que proporciona la elongación que sufren los resortes, se puede tener un acelerómetro mecánico aplicando simplemente la Ley de Hooke.

En los acelerómetros contruidos con la tecnología MEMS (Microelectromechanical System) del tipo capacitivo, la medición de dicha elongación se logra según el cambio de la capacitancia entre dos placas conductoras entre las que se encuentra dispuesto un dieléctrico. De forma que al presentarse un movimiento paralelo a dichas placas se presenta una variación en la capacitancia, y con dicha variación ocurre, también, una variación de tensión. Al medir dicha tensión se tiene información sobre la aceleración que sufre el acelerómetro con respecto a la gravedad. Ver figura 2.3.

Este tipo de sensores no solo se puede utilizar para medir aceleraciones, sino también para realizar mediciones indirectas de otras variables, como por ejemplo: velocidades, ángulos, fuerzas, entre otras.

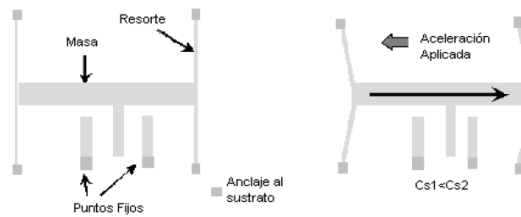


Figura 2.3. Principio de funcionamiento de un acelerómetro capacitivo.

Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

En el desarrollo de vehículos auto balanceados, se utiliza un acelerómetro para medir indirectamente el ángulo de inclinación debido a su bajo costo comercial, ya que, en el mercado existen medidores de ángulos directamente, pero estos, son de costos bastante elevados.

Por otro lado, se tiene que una forma de medir un ángulo de inclinación con un acelerómetro, es aprovechar el vector gravedad como referencia y la medición directa de la aceleración arrojada por el acelerómetro en cualquiera de sus ejes.

2.1.3 Giroscopio

El giroscopio es un tipo de sensor que se utiliza para medir la velocidad angular de un cuerpo en rotación.

Los giroscopios se pueden calificar en varios tipos, tales como: capacitivos, de estructura vibrante, mecánicos, entre otros. Para este proyecto se utiliza un giroscopio de estructura vibrante o también conocido como giroscopio de vibración de Coriolis.

En cuanto a estos últimos se tiene que, son sensores que aprovechan el llamado “Efecto Coriolis” el cual es un efecto que aparece cuando un objeto se mueve en un sistema de referencia en rotación, y consiste en que dicho objeto se vea afectado por una aceleración respecto al sistema en rotación. Esta aceleración es perpendicular al eje de giro del sistema y varía según el objeto se acerque o se aleje

del eje de giro. De forma que en estos giroscopios se dispone una masa vibrante en un disco, por ende al hacer girar dicho disco, la masa experimenta un desplazamiento debido al efecto Coriolis. Ver Figura 2.4. A medida que la velocidad de giro del disco se incrementa el desplazamiento de la masa vibrante aumenta.

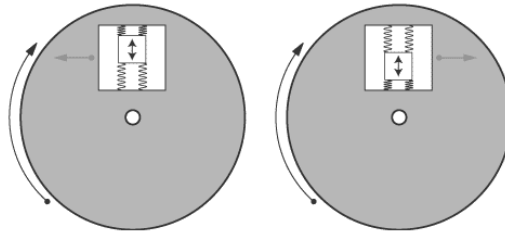


Figura 2.4. Funcionamiento de un giroscopio de vibración de Coriolis.

Fuente: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-03/gyro.html>

Con este tipo de sensor no sólo se pudiera medir velocidades angulares, sino también, otro tipo de variables como: ángulos, distancias, aceleración angular, entre otros.

2.1.4 Sensor de corriente de efecto Hall

Estos sensores están diseñados para medir corrientes eléctricas que circulan a través de un conductor, estas corrientes pudieran ser del tipo variable o del tipo constante.

En el mercado existen diferentes tipos de sensores de corrientes, entre ellos se encuentran: shunt de corriente, de efecto Hall, transformador de corriente, entre otros. En el presente proyecto se utiliza un sensor de corriente de efecto Hall.

Estos sensores tienen la ventaja de que son económicos, consumen poca potencia, son lineales entre el rango de medición y pueden medir corrientes directas y variables.

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores consiste en que si un conductor por el que circula una corriente se ve sometido a un campo magnético

perpendicular al flujo de la corriente, aparecerá a través de dicho conductor una tensión. Dicha tensión, es proporcional al producto del campo magnético y la corriente [2]. Este efecto llamado Efecto Hall es aprovechado por estos sensores para realizar mediciones de corrientes.

En términos generales, en el desarrollo de un vehículo auto balanceado es importante tener conocimiento frecuentemente de la corriente que proporcionan las baterías, con la finalidad de diseñar sistemas de seguridad, que resguarden la integridad tanto del vehículo como del conductor.

2.1.5 Filtro complementario

Todo sistema de control está sujeto a perturbaciones de diferentes tipos, las cuales hacen que la salida del sistema sea diferente a la que se obtendría bajo condiciones ideales. Por esta razón, se deben poner en práctica distintas técnicas que permitan que, aún en presencia de estas perturbaciones, el sistema se comporte de forma satisfactoria.

Por otro lado, es sabido que en sistemas de control de vehículos basados en péndulos invertidos es usual utilizar dos sensores, uno que permita la medición de la velocidad angular del péndulo y otro que permita la medición del ángulo que este forma con respecto a un eje particular. También, es común, que en dichos sistemas se utilice para la medición de la velocidad angular, un giroscopio y para la medición del ángulo, un acelerómetro. De forma que la salida de ambos sensores, se digitalizan haciendo uso de convertidores analógico-digital, para posteriormente utilizar dichas variables en el sistema de control del péndulo.

En este sentido, se tiene que la velocidad angular proporcionada por el giroscopio puede acondicionarse y utilizarse directamente en el sistema de control. No obstante, la medición del ángulo es bastante particular, ya que un acelerómetro, realmente, mide aceleraciones, es decir, la medición del ángulo se realiza de forma indirecta utilizando trigonometría. Además, al realizar mediciones de aceleraciones,

este sensor es susceptible a cualquier vibración que se presente en el sistema, incluso a la propia aceleración del vehículo, por ende, la aceleración de salida del sensor presentará alteraciones que estarán presentes, también, en el ángulo que se calcule indirectamente. De igual forma, a esta susceptibilidad se le debe agregar el hecho de que el acelerómetro posee un importante ruido mecánico de alta frecuencia, el cual también alterará la medición del ángulo. Por esta razón, no puede utilizarse la medición directa del acelerómetro en el sistema de control del vehículo.

Se puede agregar un filtro pasabajo a la salida del acelerómetro para reducir el efecto del ruido mecánico de este. Sin embargo, la adición de este filtro no solucionaría el problema de la susceptibilidad de este sensor a las vibraciones. Además, la adición de este filtro agregaría otro inconveniente y es que el filtro pasabajo haría más lento el sistema.

Se puede pensar, entonces, en utilizar el giroscopio para la medición del ángulo, realizándole a la velocidad angular una integración numérica para obtener el ángulo y agregando un filtro pasaalto para reducir el ruido de baja frecuencia que presenta el giroscopio. De esta forma se tendría que utilizar un solo sensor en el vehículo, lo que resulta conveniente económicamente. Sin embargo, el giroscopio posee un nivel de offset que generaría una deriva importante al aplicar la integración numérica (ruido de baja frecuencia). Esta deriva haría que se incrementara gradualmente el ángulo medido, aun cuando el péndulo se encuentre en una posición angular fija.

Por esta razón se descarta la posibilidad de utilizar un solo sensor para la medición del ángulo y se plantea la posibilidad de utilizar tanto el acelerómetro como el giroscopio para dicha medición y hacer uso de un filtro complementario.

Un filtro complementario es un tipo de filtro que actúa sobre los diferentes tipos de ruidos que afectan a varias mediciones de una misma variable. En pocas palabras este filtro permite estimar una variable utilizando la información proporcionada por varios sensores que presentan ruido en diferentes bandas de

frecuencia. En la figura 2.5 se presenta gráficamente cómo actúa un filtro complementario en un sistema con dos entradas, en las que uno de los sensores presenta ruido a alta frecuencia y el otro lo presenta a baja frecuencia.

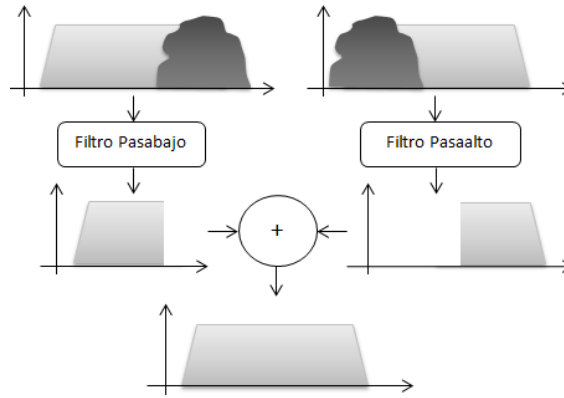


Figura 2.5. Esquema gráfico del filtro complementario en un sistema de dos entradas.

En este caso se plantea realizar el cálculo del ángulo utilizando la salida tanto del acelerómetro como del giroscopio, para poder obtener, de esta forma, una buena estimación del ángulo de inclinación. Con esto, se obtiene una compensación entre ambos sensores, ya que en el dominio de baja frecuencia la mayor influencia la tiene el acelerómetro y en el dominio de alta frecuencia actúa principalmente el giroscopio, logrando, de esta forma, compensar la deriva del giroscopio (ruido de baja frecuencia), a través del aporte del acelerómetro y compensándose, al mismo tiempo, la dinámica lenta del acelerómetro, su susceptibilidad a las variaciones y su ruido de alta frecuencia, con el aporte del giroscopio.

En la figura 2.6 se presenta el diagrama de bloques del filtro complementario que se plantea utilizar en el equipo. En dicha figura se aprecia que el ángulo estimado se obtiene de la suma de las señales provenientes del filtro pasabajo y del filtro pasaalto.

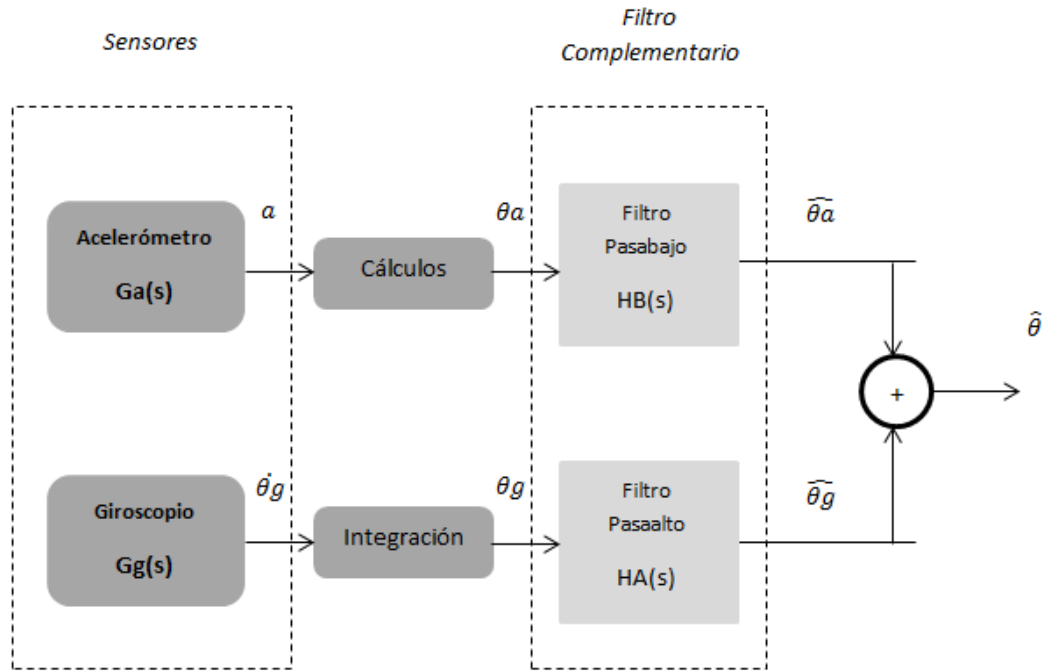


Figura 2.6. Filtro complementario para estimar un ángulo de inclinación a partir de un giroscopio y un acelerómetro.

Dónde:

α : Aceleración medida por acelerómetro.

$\dot{\theta}g$: Velocidad angular medida por el giroscopio.

$\theta\alpha$: Ángulo calculado con el acelerómetro.

θg : Ángulo calculado con el giroscopio.

$\widehat{\theta\alpha}$: Ángulo aportado por el acelerómetro una vez filtrado.

$\widehat{\theta g}$: Ángulo aportado por el giroscopio una vez filtrado.

$\widehat{\theta}$: Ángulo estimado.

Por otro lado, todo filtro complementario posee las siguientes características, según documento consultado en línea [3]:

- Para minimizar el efecto de la deriva que se genera en la integración numérica de la señal de salida del giroscopio, la señal del acelerómetro debe utilizarse en el mayor rango de frecuencias posible.
- Para que el ángulo estimado exhiba la misma dinámica que el ángulo actual en cada momento, se deben escoger las funciones de transferencia de los filtros de forma que la función de transferencia total sea igual a la matriz identidad (en sistemas con múltiples entradas) e igual a 1 en sistemas con dos entradas.

En este caso se tiene entonces que la función de transferencia del filtro tiene la siguiente forma:

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = Ga(s).HB(s) + Gg(s).HA(s) = 1 \quad (25)$$

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = Ga(s).HB(s) + Gg(s).(1 - HB(s)) = 1 \quad (26)$$

$\hat{\theta}(s)$: Ángulo de inclinación estimado

$\theta(s)$: Ángulo de inclinación

$Ga(s)$: Función de transferencia del acelerómetro

$Gg(s)$: Función de transferencia del giroscopio

$HB(s)$: Función de transferencia del filtro pasabajo

$HA(s)=1-HB(s)$: Función de transferencia del filtro pasaalto

De forma que el ángulo estimado se puede plantear mediante la ecuación (27), ver figura2.6:

$$\hat{\theta} = HB(s). \theta a(s) + HA(s). \theta g(s) \quad (27)$$

$$\hat{\theta} = HB(s). \theta a(s) + (1 - HB(s)). \theta g(s)$$

Para un $HB(s)$ igual a:

$$HB(s) = \frac{\tau}{s+\tau} \quad (28)$$

Un $HA(s)$ igual a:

$$HA(s) = \frac{s}{s+\tau} \quad (29)$$

Donde τ es la constante de tiempo de ambos filtros.

Sustituyendo las ecuaciones (28) y (29) en la ecuación (27) el sistema queda de la siguiente forma:

$$\hat{\theta} = \frac{\tau}{s+\tau} \cdot \theta a(s) + \frac{s}{s+\tau} \cdot \theta g(s) \quad (30)$$

De manera que las ecuaciones anteriores, o bien, sus equivalentes en tiempo discreto, son las que se utilizan para el diseño del filtro complementario.

Finalmente, la velocidad angular medida con el giroscopio y el ángulo estimado haciendo uso del filtro complementario representan las variables que se utilizan posteriormente para el control del vehículo.

2.1.6 Controladores: Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD) y Proporcional Integral Derivativo (PID)

Las técnicas de control han evolucionado con el pasar de los años. De hecho, hoy en día existe una amplia gama de métodos de control, entre los cuales destacan los clásicos controladores P, PI, PD y PID, o algunas formas modificadas de éstos, los cuales continúan utilizándose ampliamente aun cuando han aparecido novedosas técnicas de control en los últimos años. De hecho, “más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado” [4].

En cuanto a las diferentes acciones de control se tiene:

2.1.6.1 Acción proporcional

Consiste, básicamente, en un amplificador de ganancia sintonizable que se agrega a la planta de un sistema de control con la finalidad de disminuir el tiempo de subida y disminuir el error en estado estacionario. Sin embargo, esta acción de control incrementa el sobrepico e incrementa las oscilaciones del sistema, a mayor acción proporcional se tendrá un menor error en estado estacionario pero, también, se tendrá un mayor sobrepico y un mayor número de oscilaciones.

La acción proporcional actúa en función de cuán lejos se está del objetivo de control. En este sentido se tiene que la salida es proporcional al error y tiene la forma de la ecuación (31):

$$u(t) = Kp \cdot e(t) \quad (31)$$

$$e(t) = y(t) - r(t) \quad (32)$$

Dónde: **$u(t)$** : Salida de la acción integral

Kp : Constante de proporcionalidad

$e(t)$: Error del sistema

$y(t)$: Salida del sistema

$r(t)$: Punto de referencia

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = Kp \cdot E(S) \quad (33)$$

2.1.6.2 Acción integral

Actúa en función a cuán rápido se llega al objetivo de control. En esta acción de control la salida es proporcional a la integral del error, es decir, la acción integral

suma el error en cada ciclo. A medida que al sistema le tome más tiempo alcanzar el objetivo de control la salida de la acción integral se incrementará, ya que la integral del error aumenta. Se trata de un tipo de acción lenta que hace que el error en estado estacionario sea igual a cero para una entrada escalón, pero que, al mismo tiempo, incrementa el número de oscilaciones y hace más inestable el sistema al añadir un polo en el origen, razón por la cual esta acción se utiliza conjuntamente con la acción proporcional.

La salida de la acción integral es diferente de cero aun cuando el error del sistema sea igual a cero. Dicha salida se define según la ecuación (34):

$$u(t) = Ki \cdot \int e(t) \cdot dt \quad (34)$$

Ki : Constante Integral

Aplicando transformada de Laplace:

$$U(S) = Ki \cdot \frac{E(S)}{s} \quad (35)$$

2.1.6.3 Acción derivativa

Actúa en función a cuán variable es el error. Este tipo de acción es anticipativa y de previsión y actúa sobre cambios repentinos del error. La salida es proporcional a la derivada del error, lo que permite que se pueda hacer cierta predicción de la señal del error.

La acción derivativa no actúa directamente sobre el error del sistema, razón por la cual nunca se utiliza sola. Entre las ventajas de esta acción de control se tiene que el sistema se hace más estable, se añade amortiguación al sistema (menos oscilaciones) y hace que el sistema sea más rápido. Sin embargo, la acción derivativa puede saturar al actuador y amplificar señales de ruido [5].

La salida de la acción derivativa viene dada por la ecuación 36:

$$u(t) = Kd. \frac{de(t)}{dt} \quad (36)$$

Kd : Constante Derivativa

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = Kd. s. E(S) \quad (37)$$

Por otro lado, estas acciones de control se combinan para ser aplicadas a los sistemas físicos, ya que como se dijo anteriormente ni la acción integral ni la derivativa pueden aplicarse por sí solas. De forma que, se encuentran controladores PI, PD y PID, cuyas relaciones entre la salida y la señal error se presentan a continuación:

Control PI:

$$u(t) = Kp. e(t) + \frac{Kp}{Ti} \cdot \int e(t). dt \quad (38)$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = Kp. E(S) + \frac{Kp}{Ti} \cdot \frac{E(S)}{s} \quad (39)$$

Control PD:

$$u(t) = Kp. e(t) + Kp. Td. \frac{de(t)}{dt} \quad (40)$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = Kp. E(S) + Kp. Td. s. E(S) \quad (41)$$

Control PID:

$$u(t) = Kp. e(t) + \frac{Kp}{Ti} \cdot \int e(t). dt + Kp. Td. \frac{de(t)}{dt} \quad (42)$$

$$U(S) = Kp \cdot E(S) + \frac{Kp}{Ti} \cdot \frac{E(S)}{s} + Kp \cdot Td \cdot s \cdot E(S) \quad (43)$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti}$$

$$Kd = Kp \cdot Td$$

Td : Tiempo Integral

Td : Tiempo Derivativo

Así, cada controlador poseerá las características combinadas de las acciones de control que este contenga, tomando en cuenta, obviamente, que la variación de una de ellas afectará, también, a las otras, ya que hay cierta dependencia. De igual forma, la combinación de dichas acciones de control dependerá de cada situación y de los requerimientos en régimen estacionario y en régimen transitorio que se presenten.

En la tabla 2.1 se presenta una comparación general entre los controladores Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Derivativo (PD), tomando en cuenta que ni la acción integral ni la derivativa pueden aplicarse por sí solas.

Tabla 2.1. Comparación general de los controladores P, PI y PD

Acción de control	Tiempo de subida	Tiempo de establecimiento	Sobrepico	Error en estado estacionario	Oscilaciones
Proporcional	Disminuye	Variación menor	Aumenta	Disminuye	Aumenta
Proporcional Integral	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Se hace cero	Aumenta
Proporcional Derivativo	Variación menor	Disminuye	Disminuye	Variación menor	Disminuye

2.1.7 Motor de corriente continua

Hasta hace pocos años los motores más utilizados para aplicaciones de control eran los motores de corriente alterna, sin embargo, la dificultad para controlar este tipo de motores, así como, su no linealidad y la disminución en el precio de otros tipos de motores generó que poco a poco los motores de corriente alterna perdieran campo en el área de automatización y control, y que, simultáneamente, los motores de corriente continua se hicieran cada vez más populares. De hecho, en la actualidad los motores de corriente continua representan una de las principales y más versátiles fuentes motrices en aplicaciones de control en la industria, aún cuando los motores sincrónicos alcanzan cada vez mayor popularidad.

El principal motivo por el cual los motores de corriente continua representan una gran opción en aplicaciones de automatización y control es su fácil control de posición, velocidad y frenado.

Este tipo de motores se utilizan principalmente en aplicaciones en las que se debe controlar regularmente la velocidad y/o en aplicaciones en las que se deben utilizar, inminentemente, baterías para alimentar el motor.

2.1.7.1 Principio de funcionamiento

Un motor de corriente continua transforma energía eléctrica en energía mecánica y está formado, básicamente, por un estator y un rotor, también llamados inductor e inducido o campo y armadura, respectivamente.

En la figura 2.7 se presenta un esquema general de las partes de un motor CC, así como su circuito equivalente.

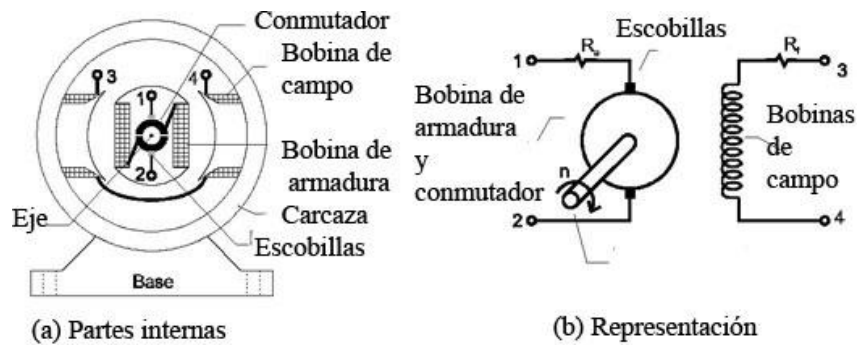


Figura 2.7. (a) Partes de un motor CC, (b) Circuito equivalente de un motor CC

Fuente: http://www.sapiensman.com/electrotecnia/motor_electrico.htm

Estató: el estató es, básicamente, la parte fija del motor. Está formado por:

- Imán Permanente (el estató puede o no tener esta pieza según el tipo de motor): se encarga de suministrar un campo magnético uniforme que interactúa con el campo magnético generado por el bobinado del rotor. La interacción de dichos campos genera, a su vez, el movimiento giratorio del rotor.
- Escobillas (el estató puede o no tener esta pieza según el tipo de motor): las escobillas son piezas, por lo general de carbón, cuya función es transmitir la tensión de alimentación hacia el conmutador o colector. Las escobillas se mantienen en su posición gracias a un sistema de resortes dispuesto en las portaescobillas, dicho sistema ejerce presión sobre las escobillas contra el colector, para garantizar el contacto entre ambas piezas.
- Armazón: pieza que sirve de soporte y que se encarga de suministrar una trayectoria de retorno a los flujos magnéticos presentes (el del imán permanente o devanado de estató y el del rotor), completando, de esta forma, el circuito magnético.
- Devanado del Estató o Devanado de los Polos (el estató puede o no tener esta pieza según el tipo de motor): consiste en un conjunto de arrollados por los cuales circula una corriente (proveniente de la fuente

externa) que produce un campo magnético. Este devanado se encuentra en el motor en el caso de que éste sea del tipo de campo devanado.

Rotor: también llamado Armadura, suministra el torque para mover la carga y representa la parte móvil del motor. El rotor está formado por:

- Eje: consiste en una pieza cilíndrica sobre la cual se realiza el ajuste del devanado del rotor y el núcleo.
- Conmutador: el conmutador gira con el eje debido a que se ubica sobre uno de los extremos de este. Esta pieza, constituida por material conductor, está en contacto con las escobillas, las cuales transmiten la tensión de alimentación al conmutador y este, a su vez, trasmite dicha tensión a las bobinas del devanado del rotor. A medida que se realiza el giro, la corriente circula por la bobina apropiada.
- Núcleo: pieza de material ferromagnético que suministra un camino magnético entre los polos.
- Devanado del Rotor: bobinas alojadas en ranuras que son practicadas en la periferia del núcleo y las cuales se conectan a la alimentación través del conmutador.

El funcionamiento de un motor de corriente continua se basa en el hecho de que, cuando un conductor que es recorrido por una corriente eléctrica se sumerge en un campo magnético, dicho conductor experimenta una fuerza que es perpendicular al plano formado por la corriente y el campo magnético (Fuerza de Lorentz).

En un motor de corriente continua al conectar la alimentación en el devanado del estator se produce un campo magnético. En el caso de motores de corriente continua de imán permanente dicho campo magnético es producido por este imán sin necesidad de tener que alimentar eléctricamente un devanado asociado al estator.

Al conectar la alimentación, se hace circular una corriente en el sistema batería-escobilla-conmutador-bobina del rotor, de forma que, en esta última, la corriente circula en un sentido por uno de sus lados y en el sentido contrario por el otro lado (se debe recordar que dicha bobina forma una espira conductora). Al estar la bobina del rotor expuesta al campo magnético generado en el estator, se ejerce una fuerza sobre cada lado de la espira que forma la bobina, una hacia arriba y la otra hacia abajo. Estas fuerzas hacen que la bobina gire hasta que alcanza la posición vertical, momento en el cual el conmutador invierte el sentido de la corriente para que la bobina continúe girando (gire la media vuelta faltante). Este ciclo se repite una y otra vez, generando el giro del motor.

La velocidad de giro puede regularse, controlando la corriente en el inductor o en el inducido o en ambos.

2.1.7.2 Tipos de motores según la construcción de la armadura o rotor

Los motores de corriente continua pueden ser con escobillas o sin escobillas, en los primeros, la conmutación de la corriente de la armadura es mecánica, mientras que en los segundos dicha conmutación es eléctrica.

Por otro lado, como se describió anteriormente, el campo magnético de un motor de corriente continua puede ser producido por un imán permanente (motores de imán permanente) o por un conjunto de bobinas (motores de campo devanado).

Sin embargo los motores más utilizados en aplicaciones de control son los de imán permanente. Éstos resultan más confiables ya que al no poseer bobinas de campo, no existe la posibilidad de que se genere una sobrevelocidad por falla del campo, además disminuyen las pérdidas de potencia en el campo. Al mismo tiempo, en estos motores la característica par-corriente es más lineal que en los motores de campo devanado. Sin embargo, este tipo de motores no permite realizar control por campo y requieren que se tenga cuidado con las sobrecargas, ya que éstas pueden desmagnetizar el imán, lo que cambiaría la característica velocidad-par del motor.

Los motores de imán permanente, a su vez, pueden ser, de imán permanente de núcleo de hierro (poseen alta inercia y alta inductancia), de devanado superficial (poseen baja inductancia) y de bobina móvil (poseen baja inercia y baja inductancia).

2.1.7.3 Control de motores de corriente continua

Si se desea controlar el encendido, el frenado y la marcha en un solo sentido de un motor de corriente continua se pueden utilizar distintas configuraciones circuitales utilizando relés o transistores. Sin embargo si se desea controlar también el sentido de giro del motor se debe invertir el sentido de la corriente que circula por el inductor o de la corriente que circula por el inducido (en caso de que el motor no sea de imán permanente), para lo cual se debe invertir la polaridad de la fuente de alimentación conectada a las terminales del motor.

Para controlar el sentido de giro también se utilizan circuitos con uno o varios relés, circuitos con transistores, de los cuales el más utilizado es el denominado Puente H y circuitos integrados (los cuales en su mayoría realizan la misma función de un puente H).

2.1.7.4 Modelo matemático de motores de corriente continua de imán permanente

Se sabe entonces que las bobinas del inducido se ven afectadas por una fuerza, debido a la presencia del campo magnético, la cual hace girar al rotor, proporcionándole a éste un par electromagnético.

Como lo indica el autor Benjamín Kuo “el par desarrollado en el eje del motor es directamente proporcional al flujo en el campo y a la corriente en la armadura” [6]. De forma que el par queda expresado matemáticamente como se muestra en la ecuación (44):

$$T_m(t) = K_m \cdot \phi(t) \cdot i_a(t) \quad (44)$$

T_m : Par del motor

Φ : Flujo Magnético del Campo

ia : Corriente de Armadura

Km : Constante de Proporcionalidad

Como se trata de motores de imán permanente, el flujo Φ es constante y la ecuación (44) queda expresada de la siguiente forma:

$$Tm(t) = Ki \cdot ia(t) \quad (45)$$

Ki =Constante de Par

Al moverse el conductor de la armadura en el campo magnético, se produce una tensión en las terminales de éste. Esta tensión tiende a oponerse al sentido de la corriente del conductor y es proporcional a la velocidad del eje. Esta tensión se conoce como ‘‘fuerza contraelectromotriz’’ y matemáticamente se modela de la siguiente forma:

$$eb(t) = Kb \cdot \phi(t) \cdot wm(t) \quad (46)$$

eb : Fuerza Contraelectromotriz

Kb : Constante de fuerza contraelectromotriz

Φ : Flujo Magnético del Campo

Wm : Velocidad del Eje

Como el flujo es constante:

$$eb(t) = Kb \cdot wm(t) \quad (47)$$

kb : Constante de Fuerza Contraelectromotriz

Realizando análisis circuital al circuito de la armadura, ver figura 2.7, se obtiene la siguiente ecuación:

$$ea(t) = Ra. ia(t) + La. \frac{dia(t)}{dt} + eb(t) \quad (48)$$

ea(t): Voltaje aplicado

Ra: Resistencia de armadura

La: Inductancia de armadura

ia(t): Corriente de armadura

En cuanto a la parte mecánica se tiene:

$$\frac{d^2\phi m(t)}{dt^2}.Jm = Tm(t) - Tl(t) - Bm. \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (49)$$

Jm: Inercia del motor

Bm: Coeficiente de fricción viscosa

Tl(t): Par de carga

En resumen el sistema queda modelado matemáticamente por las ecuaciones:

$$Tm(t) = Ki. ia(t) \quad (45)$$

$$eb(t) = Kb. wm(t) \quad (47)$$

$$ea(t) = Ra. ia(t) + La. \frac{dia(t)}{dt} + eb(t) \quad (48)$$

$$\frac{d^2\phi m(t)}{dt^2}.Jm = Tm(t) - Tl(t) - Bm. \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (49)$$

2.1.8 Puente H

En una gran cantidad de aplicaciones de robótica es necesario hacer girar motores con la finalidad de impulsar determinados sistemas electromecánicos. Cuando en este tipo de aplicaciones se emplean motores de corriente continua, es

común utilizar un circuito denominado “Puente H” que permite, precisamente, hacer girar dichos motores en ambos sentidos.

Un Puente H es un circuito que permite controlar un motor eléctrico de corriente continua, permitiendo encenderlo, apagarlo y cambiar el sentido de giro, acciones de control, todas realizadas desde un circuito digital. En cuanto al sentido de giro, este circuito, básicamente, invierte la polaridad de la tensión en las terminales del motor, lo que genera un cambio en el sentido de giro.

El esquema general de un puente H se presenta en la figura 2.8. En dicha imagen se puede apreciar que el Puente recibe su nombre debido a que su esquema circuital tiene forma de letra H, en cuya rama central se encuentra dispuesto el motor y en cuyas ramas laterales se disponen los conmutadores, en este caso representados por los transistores Q1, Q2, Q3 y Q4.

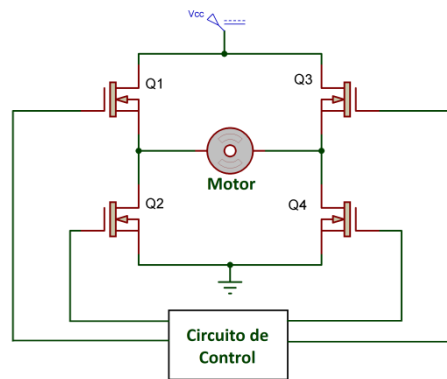


Figura 2.8. Esquema general de un puente H

Para hacer girar el motor se deben activar los conmutadores por pares opuestos, es decir, activar los transistores Q1 y Q4 simultáneamente, para un sentido de giro (Estado 1 visualizado en Figura 2.9) y Q2 y Q3 simultáneamente para el otro sentido de giro (Estado 2 visualizado en la Figura 2.10). Por otro lado, el circuito de control es el encargado de realizar esta activación por pares opuestos, y debe evitar, a toda costa, activar los conmutadores superior e inferior de una misma rama ver figura 2.12, ya que esto puede generar la destrucción de los elementos que realizan las

conmutaciones, que en la mayoría de los casos son transistores de elevado costo y al mismo tiempo esta conexión generaría daños en la batería del circuito.

En la figura 2.11 se presenta el estado de frenado del motor utilizando un Puente H. Es importante mencionar que también se puede realizar el frenado del motor utilizando su propia inercia, desactivando todos los conmutadores Q1, Q2, Q3 y Q4.

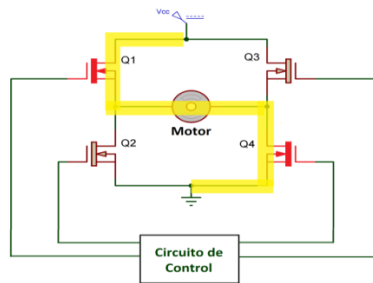


Figura 2.9. Estado 1 del puente H: giro en un sentido

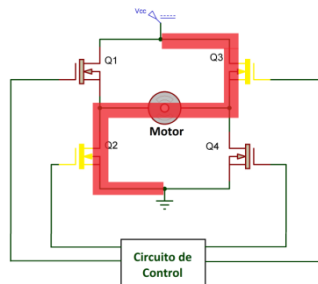


Figura 2.10. Estado 2 del puente H: giro en el otro sentido

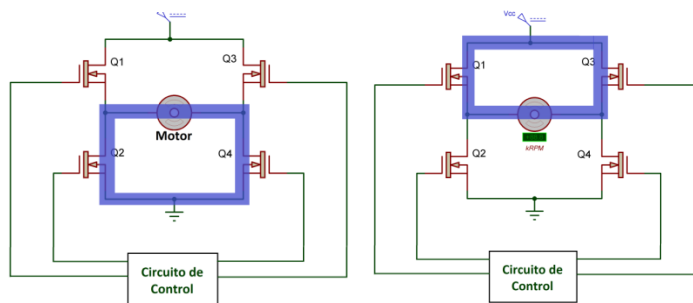


Figura 2.11. Estado 3 del puente H: frenado

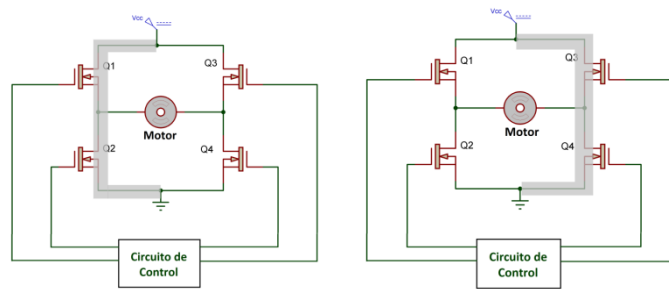


Figura 2.12. Estados que debe evitarse en un puente H

En el diseño de un puente H se debe decidir qué tipos de conmutadores se van a utilizar y cómo será la etapa del circuito de control que opere como controlador para el puente H, de forma que suministre la señal eléctrica necesaria para activar y desactivar los conmutadores.

En cuanto a los conmutadores, se tiene que, por lo general se utilizan transistores BJT o MOSFET, siendo estos últimos los más comunes debido a que mejoran la eficiencia del puente. Los MOSFET poseen resistencias de canal de muy bajo valor, lo que hace que las pérdidas de potencia en los transistores sean bastante bajas, lo que, a su vez, hace que el motor reciba una mayor potencia. Esta característica permite que se utilicen disipadores de menores tamaños y/o más sencillos. Por otro lado los MOSFET son controlados por tensión y no por corriente como los BJT, y esto resulta muchas veces, más conveniente y sencillo.

Por otro lado, se pueden utilizar MOSFET canal N, canal P o una combinación de ambos, esto ya dependerá de factores como: precio, controlador a utilizar y accesibilidad.

2.1.9 Modulación por ancho de pulso

La modulación por ancho de pulso o PWM como es conocido por sus siglas en inglés (Pulse Width Modulation) es una técnica que permite transmitir información por un canal determinado de comunicación o tener control sobre la cantidad de

energía que se entrega a un dispositivo. Esta técnica se basa en hacer variar dinámicamente el ciclo de trabajo de una onda periódica, por lo general una señal cuadrada, en función de un parámetro específico.

Se debe recordar que el ciclo de trabajo de una señal periódica es la relación entre el tiempo en el que la señal se encuentra en su parte positiva, comúnmente denotado como T_{ON} y el período de la misma, denotado como T . El ciclo de trabajo se expresa, matemáticamente como se muestra en la ecuación (50).

$$CT\% = \frac{T_{on}}{T} \cdot 100\% \quad (50)$$

La modulación por ancho de pulso se utiliza en aplicaciones para controlar motores, fuentes conmutadas, la luminosidad de LEDs, entre otros.

En cuanto al uso de modulación por ancho de pulso en aplicaciones con motores CC se tiene que este tipo de modulación se emplea para controlar la velocidad de dichos motores. Este tipo de control consiste en controlar la cantidad de energía que se le entrega al motor. Básicamente, se controla el tiempo de encendido y de apagado del motor a través de una circuitería de potencia, si, por ejemplo, el tiempo de encendido es el 50% del tiempo entonces la velocidad del motor será, aproximadamente, la mitad de la velocidad nominal.

Al controlar la velocidad de motores de corriente continua con modulación de ancho de pulso, se obtiene una mayor eficiencia que al controlarlos con un regulador de tensión o con resistencias variables, ya que en estos últimos casos los circuitos reguladores consumen una gran cantidad de la energía suministrada al motor. Además, al utilizar PWM no se obtiene una variación del par al variar la velocidad, ya que no se varía la tensión eléctrica aplicada a las terminales del motor.

2.1.10 Baterías

De acuerdo con bibliografía en línea las baterías son dispositivos que, a través de procesos electroquímicos, almacenan energía eléctrica. Una vez almacenada, esta energía puede ser entregada y utilizada posteriormente.

Se puede decir que existen dos tipos de baterías, las primarias, llamadas comúnmente pilas, las cuales pueden proporcionar energía a través de un proceso electroquímico que no es reversible, y las secundarias, denominadas baterías o acumuladores, las cuales permiten almacenar energía a través de procesos electroquímicos reversibles.

2.1.10.1 Principio de funcionamiento

Las baterías funcionan basándose en un proceso de doble conversión de energía una conversión de energía eléctrica en energía química durante el proceso de carga (se genera una reacción química a partir del suministro de electrones) y otra conversión de energía química en energía eléctrica en el proceso de descarga (se producen electrones a través de una reacción química).

Esta doble conversión se efectúa gracias a la presencia de dos electrodos y un electrolito que sirve como medio para enlazar los dos electrodos. Este grupo formado por los electrodos y el electrolito constituyen lo que se conoce como una celda de la batería. El voltaje de salida de una celda varía en cada tipo de batería, en una batería de plomo ácido, por ejemplo, este voltaje es de, aproximadamente, 2V. Dichas celdas se conectan en serie para estructurar baterías con los niveles deseados de tensión.

2.1.10.2 Parámetros de una batería

- Voltaje Nominal: es el voltaje en las terminales de una celda. Esta tensión varía de una tecnología a otra.
- Capacidad: se refiere a la cantidad de carga que puede almacenar la batería. La cantidad de carga se mide en Coulomb (C), sin embargo,

comúnmente se expresa la capacidad de una batería en Ampere Hora (Ah), tomando en cuenta que 1Ah equivale a 3600C. Al expresar la capacidad de la batería en Ah, se puede indicar cuánta corriente puede entregar la batería en un tiempo determinado, sin que la tensión esté fuera de los límites.

- Autodescarga: es el proceso de descarga que sufren las baterías aun cuando no se utilicen. Tanto el envejecimiento de la batería como la temperatura incrementan la autodescarga.
- Longevidad: se refiere al período de tiempo en el que la batería operará correctamente y bajo las condiciones normales de funcionamiento. La longevidad también puede expresarse en la cantidad de ciclos que soporta la batería, definiendo ciclo como el período de carga y descarga de la batería.
- Resistencia: se refiere a la resistencia interna que posee la batería, la cual es baja cuando la batería está en buen estado.
- Características de Carga: estas características vienen dadas por las curvas de carga de la batería, las cuáles proporcionan información acerca de cómo varía la tensión de la batería, en el proceso de carga, en función ciertos parámetros, tales como, el tiempo, la temperatura y la corriente.
- Características de Descarga: vienen indicadas por una serie de gráficas que exponen cómo varía el nivel de tensión de la batería para un consumo constante de corriente. En dichas gráficas se muestra también el nivel mínimo de tensión al que debe llegar la batería, para evitar daños.
- Efectos de la Temperatura: debido a la presencia en las baterías de componentes químicos, la temperatura juega un papel importante en el desempeño de éstas, al punto de que afecta notablemente su capacidad, longevidad, tensión de fin de carga, tensión de fin de descarga, auto descarga, afectando, por ende, el rendimiento general de la batería.

2.1.10.3 Tipos de baterías según la tecnología de construcción

Hoy en día existe una gran variedad de baterías, las cuales se diferencian en los materiales y la tecnología de construcción. Entre los tipos de baterías más comunes se pueden mencionar:

- Baterías de Níquel-Hierro (Ni-Fe)
- Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd)
- Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (Ni-MH)
- Baterías de Polímero de Litio (Li-Po)
- Baterías de Ión-Litio (Li-ion)
- Baterías de Plomo Ácido
- Baterías de Litio Fosfato de Hierro (LiFePO₄)

2.1.10.4 Baterías de plomo ácido

De acuerdo con bibliografía consultada en línea, las baterías de plomo ácido fueron las primeras baterías recargables que se distribuyeron desde el punto de vista comercial. Este tipo de baterías siguen siendo ampliamente utilizadas debido a su bajo costo y a su facilidad de construcción.

En este tipo de baterías “el electrolito es una solución de agua destilada y ácido sulfúrico” [7] y los electrodos son elaborados de plomo o de una aleación con antimonio o calcio, pero por lo general unos electrodos son de peróxido de plomo y otros de plomo poroso. Se pueden encontrar los siguientes tipos de baterías de plomo ácido:

- SLA (Sealed lead-acid): son baterías totalmente selladas, lo que evita que se liberen los gases generados durante el proceso electroquímico y lo que evita, a su vez, que se derrame el electrolito.
- Ventiladas: son baterías que poseen cierto número de aberturas que permiten llevar a cabo tanto los procesos de mantenimiento del

electrolito, el cual es líquido, como los procesos de expulsión de los gases producidos en el interior de la batería.

- VRLA (Valve Regulated lead-acid): las baterías de plomo ácido reguladas por válvula son baterías selladas que cuentan con una válvula, la cual se activa cuando la presión en el interior de la batería excede un valor límite permisible, de forma que la activación de la válvula permite la liberación de los gases internos. Este tipo de baterías no requieren la adición de agua ya que los gases producidos durante el procesos de recombinan internamente, convirtiéndose en electrolito y por ende no hay pérdidas de agua. Por otro lado estas baterías poseen porcentajes de autodescarga menores a los porcentajes de otros tipos de baterías de plomo ácido lo que aumenta el tiempo de vida de la batería. Las baterías VRLA pueden, a su vez, clasificarse como:

- AGM (Absorbed Glass Mat): son baterías con separador de vidrio absorbente lo que evita que se produzcan derrames. Esta característica hace que estas baterías sean bastante resistentes a las vibraciones.
- Celda de Gel: el electrolito se mezcla con determinados componentes que hacen que se convierta en un gel. Al igual que las baterías AGM, las baterías de celda de gel son resistentes a las vibraciones y, además, poseen menos pérdidas por evaporación de agua.

2.1.10.5 Carga y descarga de baterías

Como se dijo anteriormente las baterías de plomo ácido están formadas por celdas, las cuales proporcionan una tensión de, aproximadamente, 2V (cada una). Sin embargo, la tensión en las terminales de una celda varía según su estado.

Para cargar las baterías se pueden utilizar los siguientes dos métodos:

- Tensión Constante: es el método más usado para cargar baterías, sin embargo no permite obtener la deseada carga rápida y sin generar daños a la batería. Básicamente, se suministra una tensión constante, la cual es dividida entre las celdas de la batería. En este método es de vital importancia controlar la corriente inicial en el proceso de carga para evitar daños en la batería.
- Corriente Constante: se aplica una corriente constante a la batería de un valor determinado y durante un tiempo específico según las características de la batería y la rapidez de carga que se desee.
- Corriente Constante-Tensión Constante: este método es la combinación de los dos métodos citados anteriormente. Inicialmente se suministra corriente constante hasta que la tensión de la batería alcance un determinado nivel, luego se suministra una tensión constante, a partir de allí la corriente comienza a disminuir gradualmente hasta que se alcanza un valor en el que, también, se mantiene constante.

2.1.10.6 Baterías de litio fosfato de hierro (LiFePO₄)

Son un nuevo tipo de baterías de Ión-Litio que ofrece una amplia gama de ventajas, incluso frente, a su familia de baterías de Litio y cuya aparición ha constituido un enorme progreso en el campo de los vehículos eléctricos. Según el artículo escrito en línea por Justin Thomas estas baterías “fueron desarrolladas por el Dr. John Goodnough de la Universidad de Texas” [8] y para vehículos eléctricos las baterías LiFePO₄ “poseen un gran rendimiento de temperatura, soportando hasta 400 grados centígrados, tienen una duración de 6 a 7 años y poseen más de 2000 ciclos de carga- descarga”[9].

Debido a que esta generación de baterías es relativamente nueva, no se encuentra mucha información de ellas, sin embargo, según la bibliografía consultada, las ventajas de este tipo de baterías se pueden resumir en:

- Baja tasa de autodescarga.

- No son tóxicas, son ecológicas.
- No necesitan mantenimiento.
- Vida útil de más de 2000 ciclos.
- Son bastante seguras, ya que el material catódico (Fosfato de Hierro FePO_4) no permite reacciones exotérmicas, por lo que estas baterías no se incendian ni explotan [10].
- Pueden permanecer largos periodos de tiempo con una descarga parcial y no sufrir daños permanentes.
- Se pueden utilizar en cualquier orientación sin sufrir daños.
- Poseen gran densidad de energía. [11]
- Poseen disponibilidad de potencia máxima, prácticamente, hasta que están completamente descargadas, es decir, sus curvas de descarga son prácticamente planas. [12]
- Se pueden recargar rápidamente (de forma segura). Estando completamente descargada se puede llevar al 90% de la carga en 15 minutos [13].

En términos generales este tipo de baterías poseen características que hacen que sean una gran opción en el desarrollo de vehículos eléctricos.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

3.1 DEFINICIÓN DEL HARDWARE

Para que un vehículo auto balanceado pueda operar correctamente, debe poseer los bloques funcionales que se presentan en la figura 3.1:

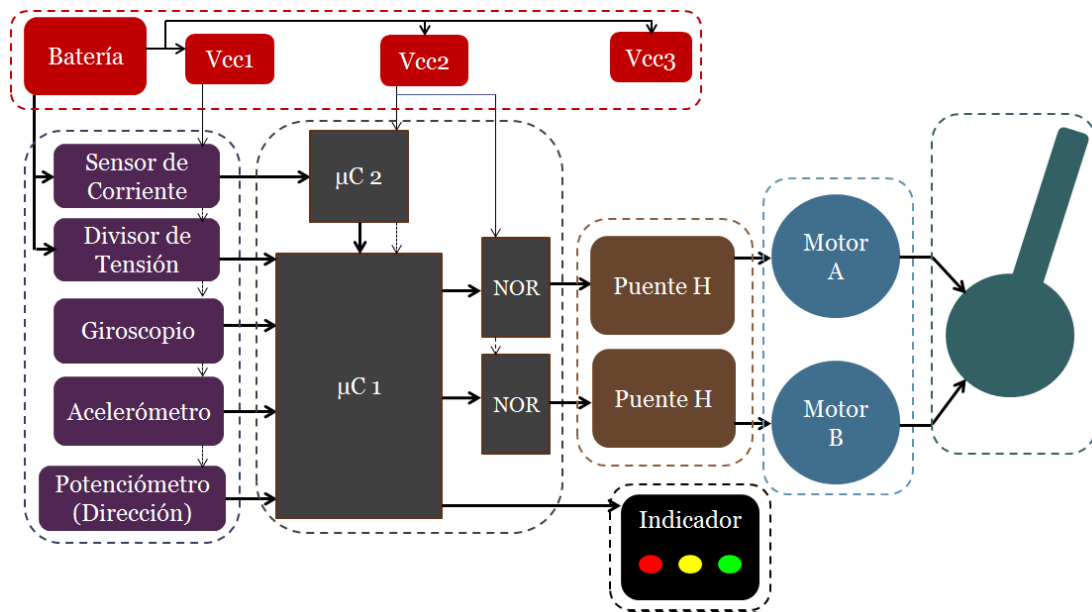


Figura 3.1 Bloques funcionales de un vehículo auto balanceado

3.1.1 Etapa de adquisición de datos

El equipo debe poseer una etapa que mida las variables físicas necesarias para el procesamiento y desarrollo del sistema de control. Dichas variables son el ángulo de inclinación y la velocidad angular del vehículo. Al mismo tiempo, se realiza la medición de la variable que permite direccionar el vehículo. A partir de la medición de dicha variable se aplica una variación en la salida del sistema de control que hace que se aplique un par diferencial a los motores, con el consecuente giro del vehículo.

Esta etapa, realiza también la medición de la corriente suministrada por la batería, con la finalidad de implementar sistemas de seguridad en caso de detectarse niveles muy altos de dicha variable.

La etapa de adquisición de datos se completa con la medición de la tensión de las baterías, que permite realizar un monitoreo constante de la carga restante de las baterías.

3.1.2 Etapa de control

Es la etapa que actúa como la “etapa cerebro” del sistema. Toma las señales medidas por la etapa de adquisición de datos, las acondiciona y las procesa para generar las señales de control necesarias para equilibrar al vehículo. Dichas señales de control son enviadas a la etapa de potencia para el manejo de los actuadores.

En esta etapa se evalúa el estado actual del vehículo y cuán lejos está éste del objetivo de control, de forma que se calculen las órdenes de control necesarias para acercar al sistema a dicho objetivo de control.

La etapa de control también se encarga de realizar los distintos procesos de monitoreo que permiten dar información del vehículo al conductor, a través de la etapa de interfaz.

Al mismo tiempo, esta etapa lleva a cabo los distintos sistemas de seguridad que garantizan el funcionamiento del vehículo en condiciones seguras.

3.1.3 Actuadores

Los sistemas de control poseen dispositivos que permitan generar la orden necesaria para comandar el elemento final de control. Estos dispositivos, por lo general, transforman un tipo de energía en otra, cuyas magnitudes puedan generar un efecto sobre el proceso que se está controlando.

En los vehículos auto balanceados los actuadores son motores eléctricos, los cuales permiten transformar las magnitudes de control eléctricas en magnitudes mecánicas que actúan sobre las ruedas (elementos finales de control), las cuales, a su vez, actúan en el proceso de búsqueda de equilibrio del vehículo.

3.1.4 Etapa de potencia

Generalmente, la etapa de control suministra señales cuyos niveles no son suficientes para hacer funcionar los actuadores del vehículo, y es allí donde la etapa de potencia entra en funcionamiento.

En esta etapa se disponen los circuitos que permiten proporcionar, a partir de las salidas de la etapa de control, las señales necesarias para el funcionamiento de los actuadores, que en este caso son motores de corriente continua. De manera que esta etapa posee los conmutadores de potencia que permiten el control en ambos sentidos de los motores, y los dispositivos controladores, que permiten el manejo de dichos conmutadores.

3.1.5 Etapa de alimentación

Se requiere de una etapa que suministre la energía necesaria para el funcionamiento de los componentes y dispositivos eléctricos que conforman la circuitería del vehículo.

Esta etapa debe estar compuesta por baterías recargables que permitan que el vehículo opere sin tener que estar conectado a una toma de corriente. Además, esta etapa debe suministrar todos los niveles de tensión necesarios para el funcionamiento de cada uno de los componentes que conforman las distintas etapas funcionales del equipo.

La presencia de baterías recargables, hace necesario el uso de un cargador de baterías, que permita suministrar la energía necesaria a las baterías una vez que éstas

se han descargado. De forma que, una vez conectado al cargador de batería y haber esperado el tiempo respectivo, se pueda volver a utilizar el vehículo.

3.1.6 Interfaz

Debido a que se trata de un vehículo, es importante tener indicadores que suministren información al conductor sobre diferentes eventualidades o estados del sistema. De esta manera, el conductor está al tanto del estado del vehículo en todo momento y puede tomar decisiones según la información suministrada.

3.1.7 Parte mecánica

En cualquier vehículo es importante tener una estructura mecánica que sea robusta y confiable, para poder garantizar, en la medida de lo posible, la integridad tanto del vehículo como la del conductor.

En el caso de los vehículos auto balanceados, la estructura mecánica debe poseer:

- Una plataforma donde repose el conductor.
- Dos ruedas dispuestas, de forma paralela, y que posean el mismo eje de giro de la citada plataforma.
- Un mecanismo que comunique a los motores (actuadores) con las ruedas (elementos finales de control).
- Un manubrio que permita manejar el vehículo.

3.2 DEFINICIÓN DEL SOFTWARE

El vehículo auto balanceado está formado por diferentes etapas funcionales, las cuales están comandadas por un microcontrolador principal, el cual actúa como el cerebro del equipo.

El uso de dicho microcontrolador hace necesario el desarrollo de un programa que se encargue de procesar distintas tareas del equipo.

En este caso dichas tareas son:

3.2.1 Calibración

Debido a la presencia de diversos sensores, a la variación que presenta la medición de estos según la posición del vehículo y a que el nivel cero de dichos sensores pudiera discrepar del valor proporcionado por las hojas de datos, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración.

Este proceso de calibración permite tener un punto de referencia (un nivel cero) para las mediciones posteriores de los sensores.

La calibración permite, por ende, fijar las variables (ángulo, velocidad angular y dirección) de partida, que deben corresponder, en la medida de lo posible, a un valor igual a cero para todas las variables.

Este proceso es ejecutado por el microcontrolador principal al encender el vehículo.

3.2.2 Acondicionamiento de señales

Esta etapa se encarga de ejecutar los procesos de filtrado y acondicionamiento general de las variables físicas, con la finalidad de entregar una información fiable a la etapa de control.

Esta etapa es de suma importancia, ya que para que se logre el objetivo de control, es decir, que el equipo logre equilibrarse es indispensable conocer, de la forma más precisa posible, la desviación angular en cada instante de tiempo y, de igual forma, se debe detectar de la manera más fiel posible la velocidad a la que ocurre dicha desviación angular, ya que el sistema responderá de forma distinta si se le añade una perturbación angular de forma brusca (alta velocidad angular) a que si dicha perturbación se le añade de forma suave (baja velocidad angular).

En pocas palabras mientras más grandes sean la desviación angular y la velocidad angular detectadas, mayor será el par de los motores requerido para estabilizar el sistema. Por ello, esta etapa debe suministrar las señales ángulo y velocidad angular adecuadas, ya que mediciones erradas de estas variables pueden generar el parcial o total desequilibrio del vehículo.

El proceso de filtrado y acondicionamiento de las señales proporcionadas por los sensores, es llevado a cabo por el microcontrolador principal.

Este proceso se ejecuta haciendo uso de las entradas analógico-digital del microcontrolador y la programación de filtros digitales.

3.2.3 Verificación del estado de las baterías

En la mayoría de los equipos que operan con baterías recargables es conveniente tener conocimiento acerca de la energía restante de la cual se dispone.

En este caso se desarrolla un proceso de monitoreo, que ejecuta el microcontrolador principal y que le permite al conductor tener conocimiento del nivel de carga restante de las baterías del vehículo.

3.2.4 Sistemas de seguridad

Al tratarse de un vehículo auto balanceado es importante tener ciertos sistemas de seguridad con la finalidad de resguardar al conductor y al vehículo.

De forma que se deben monitorear variables de interés como por ejemplo la corriente suministrada por las baterías, y se deben ejecutar las acciones de seguridad necesarias para evitar el daño de los componentes eléctricos y del vehículo en general.

3.2.5 Sistema de control

El sistema de control del vehículo se realiza de forma digital. El microcontrolador principal se encarga de realizar el procesamiento que permite

calcular las señales de control necesarias en cada instante de tiempo y enviarlas a la siguiente parte de la etapa de control.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

Una vez definidos los distintos bloques funcionales que debe poseer el equipo para obtener el correcto funcionamiento del mismo, se procedió a desarrollar los diseños de dichos bloques. Obteniéndose, los resultados de diseño que se presentan a continuación:

3.3.1 Adquisición de datos

La etapa de adquisición de datos en la que se miden: el ángulo de inclinación, la velocidad angular, la corriente de las baterías, la dirección y la tensión de las baterías está conformada por: tres sensores (un acelerómetro, un giroscopio y un sensor de corriente), un potenciómetro, un divisor resistivo de tensión y las entradas analógico-digital del microcontrolador principal del vehículo. A continuación se detallan las características de interés de dichos dispositivos de medición:

3.3.1.1 Acelerómetro

En el equipo se utiliza el acelerómetro ADXL320 que puede medir aceleraciones entre -5g y 5g, que se tenía en existencia, el cual está dispuesto en un módulo que permite una manipulación sencilla y práctica del sensor y que, proporciona, además, acondicionamiento a la señal de salida del ADXL320.

El ancho de banda del sensor es de 2,5kHz, pero éste puede disminuirse, conectando un condensador externo que puede ser calculado por la expresión (50) suministrada por la hoja de datos del sensor. En este sentido se tiene que el módulo con el que se está trabajando agrega un condensador de 0,1 μ F para fijar un ancho de banda de 50Hz, debido a que este módulo se utiliza en aplicaciones en las que las variaciones que se desean detectar son de baja frecuencia.

$$f_{x,y-3dB} = \frac{1}{(2.\pi.32k\Omega.C_{x,y})} \quad (50)$$

$f_{x,y-3dB}$: Ancho de banda

$C_{x,y}$: Condensador externo

En cuanto a la señal de salida del sensor (para parámetros típicos) se tiene que ésta viene dada por la ecuación (51), suministrada por la hoja de datos del sensor ADXL320:

$$V_{ox,y} = 312 \left(\frac{mV}{g} \right) . Acel_{X,Y} + Nivel_Cero_Acel \quad (51)$$

$V_{ox,y}$: Tensión de salida del acelerómetro.

$Acel_{X,Y}$: Aceleración detectada en el eje x/y.

$Nivel_Cero_Acel$: Salida del acelerómetro para el nivel cero (2,5V, teóricamente).

Esta señal de salida se conecta a una entrada analógico-digital del microcontrolador principal.

Es importante mencionar que después de medir, en varias oportunidades, el nivel cero de este sensor se encontró que éste no es igual a 2,5V, como se indica en la hoja de datos del sensor, razón por la cual este nivel se mide por software como se explicará en la descripción del software.

Por otro lado, cómo se mencionó en el marco teórico una forma de medir ángulos con un acelerómetro, es aprovechar el vector gravedad como referencia y la medición directa del sensor en uno de sus ejes. Este cálculo se realiza aplicando trigonometría como se muestra en la figura 3.2.

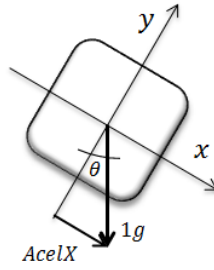


Figura 3.2. Medición del acelerómetro en el eje X

De forma que se obtiene la expresión (52):

$$\text{sen}\theta = \frac{\text{AcelX [g]}}{1g} \quad (52)$$

Despejando se tiene:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{AcelX [g]}}{1g} \right)$$

Obteniendo de esta forma el ángulo de inclinación del vehículo.

Debido a que el sistema operará cerca del punto de equilibrio, es decir, se considerará que el ángulo de inclinación tendrá pequeñas variaciones, se realiza la siguiente aproximación lineal:

$$\text{sen}\theta \cong \theta \quad \text{Para } \theta \leq \pi/6$$

Con dicha aproximación, el mayor error se obtiene para $\theta = \pi/6$ y éste es de, aproximadamente, el 5%.

De esta forma la ecuación (52) queda de la siguiente forma:

$$\theta \cong \frac{\text{AcelX [g]}}{1g} \quad (53)$$

Utilizando la ecuación (53) se obtiene una buena aproximación del ángulo de inclinación y se reduce el tiempo de cálculo del microcontrolador principal.

3.3.1.2 Giroscopio

La velocidad angular se mide utilizando un módulo que dispone de un giroscopio ADXR610 de efecto Coriolis de un eje, el cual proporciona una tensión

proporcional a la velocidad angular y posee un rango de $\pm 300^\circ/\text{s}$. Este módulo dispone, además, de una circuitería que acondiciona la señal de salida de dicho sensor.

Dicha circuitería de acondicionamiento, con un filtro pasabajo, fija la frecuencia máxima de operación del módulo en $f_{\text{max}}=402\text{Hz}$. Sin embargo, el módulo admite la conexión externa de un condensador, el cual, según la ecuación (54), tomada de la hoja de datos del sensor ADXR610, permite disminuir dicha frecuencia superior de operación (f_{max}). Debido a que el sistema posee una gran inercia, es difícil que se den variaciones mayores a 5Hz, razón por la cual se agregó a la salida del módulo un condensador de $0,2\mu\text{F}$ para disminuir la frecuencia f_{max} a 4Hz.

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{(2.\pi.180k\Omega.(2,2nF+C_{\text{ext}}))} \quad (54)$$

f_{max}: Frecuencia máxima de operación

C_{ext}: Condensador externo

La señal de salida del sensor, para parámetros típicos, viene dada por la expresión (55) (según lo extraído de la hoja de datos del sensor):

$$V_{\text{og}} = 6 \frac{\text{mV}}{\frac{\circ}{\text{s}}}. \text{VelAng} + \text{Nivel_Cero_VelAng} \quad (55)$$

V_{og}: Tensión de salida del giroscopio.

VelAng: Velocidad angular detectada.

Nivel_Cero_VelAng: Salida del giroscopio para el nivel cero (2,5V, teóricamente).

Al igual que en la sección anterior, esta señal se conecta a una entrada analógico-digital del microcontrolador principal. Es importante mencionar que, en la

práctica, al igual que en el acelerómetro, la tensión de salida para el nivel cero no es igual a 2,5V, razón por la cual dicho nivel se mide por software.

3.3.1.3 Sensor de corriente

Para la medición de corriente se utiliza el sensor de efecto Hall ACS758-100U. Este sensor es capaz de medir corrientes positivas de hasta 100A y su señal de salida (con los parámetros típicos) viene dada por la expresión (56):

$$V_{oi} = 40 \cdot \frac{mV}{A} \cdot I + Nivel_Cero_I \quad (56)$$

V_{oi}: Tensión de salida del sensor de corriente

I: Corriente medida.

Nivel_Cero_I: Salida del sensor de corriente para el nivel cero (0,5V, teóricamente).

El sensor se conecta directamente en la línea de alimentación de 24V, de forma que éstos quedan conectados en serie con las baterías. La señal de salida se introduce en el analógico-digital del microcontrolador secundario, que se encarga de monitorear frecuentemente la corriente y de generar las señales de alerta correspondientes.

3.3.1.4 Potenciómetro de dirección

El manubrio del vehículo se conecta a unas chumaceras que permiten que éste gire respecto a un eje perpendicular al eje de giro de las ruedas. Al mismo tiempo, el manubrio se conecta a la perilla de un potenciómetro, de forma tal que, al girar el manubrio, la perilla del potenciómetro también gire y se genere una variación en la tensión de salida de éste.

El potenciómetro que se utiliza es un potenciómetro lineal de 10kΩ de 270°, cuya salida se conecta a una entrada analógico-digital del microcontrolador principal,

para ser procesada y utilizada en el sistema de control, y poder de esta forma direccionar el vehículo.

3.3.1.5 Divisor de tensión de las baterías

Para realizar el proceso de monitoreo de la carga restante de las baterías se implementó un divisor de tensión resistivo, para poder medir la variación en la tensión de las baterías, ya que no es posible conectar tensiones superiores a 5V en las entradas del microcontrolador.

Este divisor de tensión se realizó con resistencias de $100\text{k}\Omega$ y $10\text{k}\Omega$ según la figura 3.3.

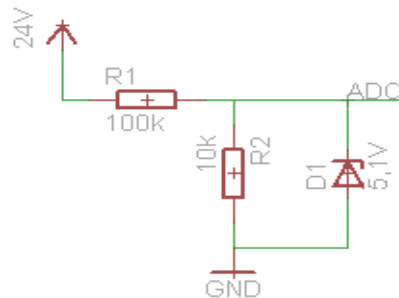


Figura 3.3 Divisor de tensión resistivo

3.3.2 Etapa de control

Como se dijo anteriormente la etapa de control es la “etapa cerebro” del equipo. Esta etapa está conformada por un microcontrolador 18F2550 (microcontrolador principal), dos compuertas lógicas NOR 74LS02 y un microcontrolador 12F683 (microcontrolador secundario).

El microcontrolador 18F2550, posee las características requeridas para el desarrollo del programa o firmware que comanda al equipo, ya que, entre otras cosas, ofrece 12 entradas analógico-digital de 10 bits, dos salidas PWM, 3 timers y dos interrupciones externas, además se tenía en existencia.

Este representa el microcontrolador principal del equipo ya que realiza el proceso de calibración, el proceso de acondicionamiento de señales, el proceso de monitoreo de la batería, ejecuta los sistemas de seguridad del equipo y calcula e implementa el sistema de control. Esta última consiste en evaluar el estado del sistema y ejecutar las acciones de control necesarias para alcanzar el objetivo de control (este proceso se detallará en la sección de descripción de software).

Por otro lado, las compuertas NOR reciben las salida del sistema de control provenientes del microcontrolador 18F2550 (salidas PWM y sentido) y ejecutan la lógica digital necesaria para hacer girar de forma correcta los motores. Ver tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tabla de verdad para las salidas de las compuertas NOR

PWM	S	IN ₁	IN ₂	Comentario
0	0	0	1	Motor gira hacia atrás
0	1	1	0	Motor gira hacia adelante
1	0	0	0	Motor se frena con tierra
1	1	0	0	Motor se frena con tierra

De la tabla 3.1 se extrae:

$$IN_1 = \overline{(PWM + \bar{S})} \quad (57)$$

$$IN_2 = \overline{(PWM + S)} \quad (58)$$

Dónde:

PWM: salida PWM del microcontrolador.

S: Sentido (1=hacia adelante, 0=hacia atrás)

IN₁: Entrada 1 controlador de puente H.

IN₂: Entrada 2 controlador de puente H.

Las ecuaciones (57) y (58) son válidas para ambos motores.

En cuanto al microcontrolador secundario 12F683, se tiene que éste se encarga de realizar el monitoreo constante de la corriente que suministran las baterías y de enviar la señal de alarma correspondiente al microcontrolador principal para que ejecute los sistemas de seguridad. El uso de un segundo microcontrolador fue necesario debido a que el proceso de monitoreo de corriente debe llevarse a cabo en todo momento, de forma que cualquier falla de corriente pueda ser detectada con la mayor rapidez posible. En pocas palabras, este microcontrolador se encarga exclusivamente de realizar el monitoreo de la corriente que entregan las baterías y proporcionar las alarmas pertinentes.

3.3.3 Actuadores

Como actuadores para el equipo se utilizan motores de corriente continua, con la finalidad de que el vehículo opere con baterías recargables. En este sentido se tiene que, se seleccionaron motores utilizados ampliamente para la construcción de bicicletas eléctricas, que resultaron económicos y los cuales han sido probados en desarrollos similares de vehículos auto balanceados. Las características de los motores seleccionados se presentan en la tabla 3.2:

Tabla 3.2. Especificaciones de los motores de corriente continua

Modelo	MY1018
Potencia	450W
Tensión	24V
Corriente con carga máxima	24A
Corriente sin carga	$\leq 2.5A$
Velocidad sin carga (antes de la reductora)	3000rpm
Velocidad sin carga	550rpm

(después de la reductora)	
Eficiencia	78%
Cociente de reducción	7.18:1

(Continuación tabla 3.2)

3.3.4 Etapa de potencia

Esta etapa está formada por dos puentes H, uno para cada motor de corriente continua.

Para la elaboración de los puentes H se decidió utilizar un controlador de puente H integrado, el cual debía poseer las siguientes características mínimas:

- Poseer entradas TTL.
- Manejar cargas de más de 24V.
- Tener un sistema de protección que evite la conexión de los dos transistores de una misma rama.
- Admitir señales PWM.

Después de la investigación acerca del uso de controladores integrados de puentes H, cómo se expuso en la sección 2.1.8 del marco teórico y luego de consultas comerciales, se encontró que uno de los más utilizados son los integrados IR2110 del fabricante International Rectifier. Sin embargo, también se encontró información interesante acerca del IR2184, el cual es una versión más nueva del IR2110. El controlador IR2184 ofrece un controlador de medio puente con una sola entrada de control, de forma que el propio integrado realiza el control de la conmutación de ambos transistores de una misma rama, minimizando, así, el número de señales de control requeridas por motor (se necesitarían solo dos señales por motor), además, el IR2184 tiene un sistema de protección que evita la conmutación simultánea de los dos transistores de una misma rama; mientras que su versión anterior, posee dos entradas

de control por lo que la conmutación del transistor superior de una rama se maneja separadamente de la conmutación del transistor inferior, por ende el número de señales de control requeridas por motor es el doble (4 señales por motor), lo que implicaría tener consideraciones extras de tiempos de retardos entre las señales para evitar la conmutación simultánea de los dos transistores de una rama. Por ende y con la finalidad de minimizar el número de señales de control para cada puente y de garantizar que las conmutaciones de los transistores de una rama sean mutuamente excluyentes, se decidió utilizar el integrado IR2184. Este controlador, además, es de menor tamaño y cumple con los requerimientos mínimos de diseño, ya que admite entradas TTL, maneja cargas hasta de 600V y admite señales PWM.

Una vez determinado el controlador del puente H se procedió a iniciar el proceso de escogencia de los transistores que operarían como conmutadores del puente H. En este sentido se tiene que el IR2184 permite la conexión de transistores MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) o IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Debido a que se utilizarán señales PWM de alta frecuencia, mayores a 20kHz, y a que no se tienen grandes requerimientos de tensión (los transistores operarán a 24V) se tomó la decisión de utilizar transistores MOSFET, los cuales, además, resultan mucho más económicos.

Por otro lado, al realizar puentes H utilizando transistores MOSFET se tiene que se pueden utilizar MOSFET canal P para los transistores superiores y canal N para los transistores inferiores, con la finalidad de hacer más fácil el proceso de conmutación, sin embargo, debido a que el controlador IR2184 posee un canal flotante para operación “bootstrap” que permite conmutar fácilmente transistores MOSFET canal N en las ramas superiores, se decidió utilizar cuatro (4) MOSFET canal N para cada puente H, considerando, además, que éstos son más económicos que los canal P.

Se escogió el transistor IRF1405, de uso común en aplicaciones con motores, el cual puede manejar corrientes de drenaje hasta de 169A, puede operar con tensiones de drenaje hasta de 55V, puede operar en un amplio rango de frecuencias y tiene, en modo de conducción, una baja resistencia de canal ($5,3\text{m}\Omega$) lo que resulta conveniente, ya que las pérdidas de potencia son pequeñas. Además, este transistor tiene un diodo interno que puede soportar picos de corriente de hasta 680A y una corriente continua de hasta 169A. Por lo que no es necesario conectar un diodo externo para la liberación de la energía del motor al cambiar el estado de alguno de los MOSFET del puente H.

En la figura 3.4 se presenta la conexión típica del controlador de puente H utilizado.

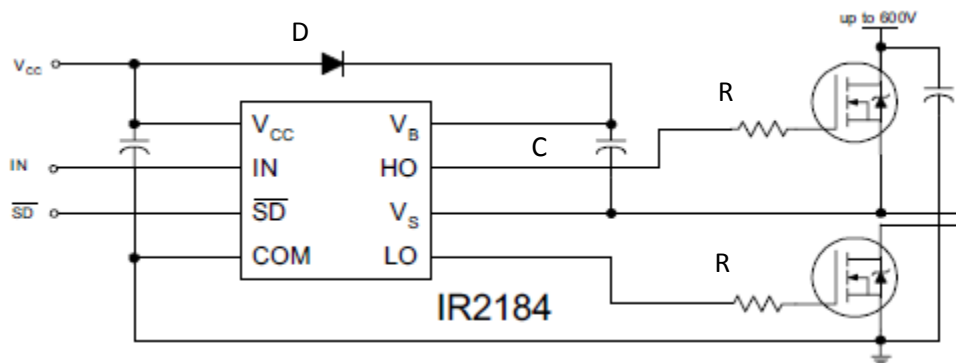


Figura 3.4. Conexión típica del controlador IR2184

Fuente: Hoja de datos del controlador IR2184

Las especificaciones que debe cumplir el diodo D1, llamado “diodo de bootstrap” se determinaron según la nota de aplicación DT-98-2 de International Rectifier. De la cual se extrajo la siguiente información:

- T_{rr} : Tiempo de recuperación en reversa $\leq 100\text{ns}$.
- I_F : Corriente continua en conducción $\geq Q_{BS} \cdot f$, para este caso. Con Q_{BS} definida según la ecuación (59).

$$Q_{BS} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \quad (59)$$

Dónde:

Q_g : Carga total de la compuerta del transistor.

$I_{qbs(max)}$: Máxima corriente del PIN V_B del IR2184 en modo inactivo.

f : Frecuencia de conmutación.

Q_{ls} : Nivel de carga de desplazamiento requerido por ciclo.

$I_{Cbs(leak)}$: Corriente de fuga del condensador (sólo aplica para condensadores electrolíticos).

Para este caso:

$$Q_g = 170 \text{ nC.}$$

$$I_{qbs(max)} = 150 \mu\text{A}$$

$$f = 20 \text{ kHz.}$$

$$Q_{ls} = 5 \text{ nC}$$

$$I_{Cbs(leak)} = 4 \mu\text{A.}$$

De forma que: $Q_{BS} = 352,70 \text{ nC.}$

Por ende el diodo debe poseer una $I_F \geq 7,05 \text{ mA}$

Se utilizó el diodo 1N4148, que se tenía en existencia, el cual es un diodo de respuesta rápida que posee una I_F de 200mA y un T_{rr} de 4ns.

En cuanto al condensador C1 llamado “condensador de bootstrap” se tiene que este, se calculó según la nota de aplicación citada anteriormente (DT-98-2 de International Rectifier), de la siguiente forma:

$$C1 \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \quad (60)$$

V_{cc} : Tensión de alimentación de los controladores IR2184=15V.

V_f : Caída de tensión del diodo de “bootstrap”= 0,72V (Diodo 1N4148).

V_{min} : Voltaje mínimo entre los pines V_b y V_s del IR2184=10V.

V_{LS} : Caída de tensión del transistor inferior y se calcula según la ecuación (61).

$$V_{LS} = R_{DS} \cdot I = R_{DS} \cdot Q_g \cdot f \quad (61)$$

$$V_{LS} = 5,3m\Omega \cdot 170nC \cdot 20kHz = 18,02\mu V$$

Obteniéndose:

$$C1 \geq 164,81nF$$

Sin embargo, en la nota de aplicación DT-98-2 de International Rectifier se recomienda que el valor calculado se multiplique por un factor de 15, aproximadamente. Obteniéndose, un valor de $C1=2,47\mu F$. Finalmente, se escogió un valor comercial de 2,2 μF para este condensador.

En cuanto a las resistencias de compuerta de los MOSFET se conectaron resistencias de menos de 10Ω que permitieran la conmutación rápida de los transistores sin incorporar picos de tensión significativos en la compuerta de los transistores. Después de probar algunos valores de resistencias, se escogió el valor final de $2,2\Omega$ para dichas resistencias de compuerta, obteniendo unos picos de tensión de aproximadamente igual a 5V.

Finalmente, para culminar el diseño del puente H, se procedió a determinar si era o no necesario el uso de disipadores de potencia. Para ello se calcula, en primer lugar, la potencia disipada por cada MOSFET para parámetros extremos de operación ($I=24A$), siguiendo las ecuaciones presentadas en la nota de aplicación de International Rectifier AN-6005 se tiene:

$$P_D = P_C + P_{conmutación} \quad (62)$$

$$P_C = I_o^2 \cdot R_{DSon} = (24A)^2 \cdot 5,3m\Omega = 3,05w \quad (63)$$

$$P_{conmutación} = \left(Vin \cdot \frac{Io}{2} \right) \cdot (t_{S(L-H)} + t_{S(H-L)}) \quad (64)$$

$$t_{S(L-H)} = \frac{Q_{GSW}}{I_{DRIVER(L-H)}} \quad (65)$$

$$t_{S(H-L)} = \frac{Q_{GSW}}{I_{DRIVER(H-L)}} \quad (66)$$

$$Q_{GSW} \approx Q_{GD} + \frac{Q_{GS}}{2} \quad (67)$$

Sustituyendo se tiene:

$$Q_{GSW} \approx 93nC + \frac{66nC}{2} \approx 124,5nC$$

$$t_{S(L-H)} = \frac{124,5nC}{1,9A} = 65,53ns$$

$$t_{S(H-L)} = \frac{124,5nC}{2,3A} = 54,13ns$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación (64) se tiene:

$$P_{conmutación} = \left(24V \cdot \frac{24A}{2} \right) \cdot (65,53ns + 54,13ns) \cdot 20kHz = 0,69w$$

Por lo tanto la potencia total de disipación es:

$$P_D = 3,74W$$

Tomando en cuenta la ecuación (68), se calcula la resistencia unión ambiente necesaria para que opere el transistor:

$$\theta_{jA} = \frac{T_{jmax} - T_A}{P_D} \quad (68)$$

Para una temperatura ambiente de 40 °C y una temperatura de unión máxima de 150 °C, según la hoja de datos del IRF1405, se tiene:

$$\theta_{jA} = \frac{175°C - 40°C}{3,74W} = 36,09°C/W$$

La resistencia térmica unión-ambiente del transistor IRF1405, según la hoja de datos es: $\theta_{jAT} = 62 °C/W$.

Como se necesita una resistencia unión-ambiente menor que la de unión-ambiente del transistor, es necesario agregar disipador para disminuir dicha resistencia.

La resistencia térmica del disipador se calcula, utilizando los datos de θ_{JC} y θ_{CS} suministrados por la hoja de datos del IRF1405, de la siguiente forma:

$$\theta_{CA} + \theta_{JC} + \theta_{CS} \leq 36,09 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (69)$$

$$\theta_{CA} \leq 36,09 \text{ }^{\circ}\text{C/W} - 0,45 \text{ }^{\circ}\text{C/W} - 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$\theta_{CA} \leq 35,15 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

El valor más cercano que se encontró en el mercado fue de $12 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

De forma que con los disipadores, se completaron los puentes H que conforman la etapa de potencia del equipo.

Como dispositivos actuadores se disponen en el vehículo dos motores de corriente continua.

3.3.5 Etapa de alimentación

Para suministrar energía al vehículo se planteó el uso de baterías LiFePO₄, que como se mencionó en el desarrollo teórico, es una novedosa generación de baterías, que presenta una gran cantidad de ventajas en el campo de desarrollo de vehículos eléctricos.

El uso de este tipo de baterías proporcionaría al vehículo un proceso rápido de carga (se pueden llevar al 90% de la carga en 15 minutos), una gran autonomía, debido a que su densidad energética (Wh/kg) es alta (aproximadamente el triple comparada de la densidad energética de las baterías de plomo ácido) y en términos generales le proporcionaría al vehículo todas las ventajas inherentes a este tipo de baterías (descritas en el desarrollo teórico).

No obstante debido a su elevado costo no se pudieron adquirir este tipo de baterías y se procedió a evaluar baterías económicas, disponibles en el mercado local, que tuvieran características aceptables según los requerimientos del proyecto, por ejemplo, baterías utilizadas en el desarrollo de sillas de ruedas.

En este sentido se tiene que se encontraron disponibles las baterías de plomo ácido VRLA con tecnología AGM (cuya descripción se detalla en la sección 2.1.10 del marco teórico), R-18 y las R-1212 del fabricante Duncan. Las R-18 proporcionan una tensión de 12V y una capacidad nominal de 18Ah, mientras que las R-1212 proporcionan el mismo valor de tensión pero una capacidad nominal de 12Ah, sin embargo, a pesar de que las R-18 proporcionarían una mayor autonomía al vehículo, estas son bastante pesadas (tienen, aproximadamente, el doble de peso de las R-1212) y son más costosas. De manera que se decidió trabajar con las baterías R-1212, ya que, además, un proveedor ofreció donar dos baterías R-1212 que tenía disponibles.

Con estas dos baterías se provee al vehículo una tensión de 24V y una capacidad nominal de 12Ah. Para calcular la autonomía que proporcionan estas baterías al vehículo se utiliza la ecuación (70) y se toma un caso promedio, es decir, un consumo constante de 12A en cada motor:

$$Autonomía = \frac{Capacidad\ nominal}{Corriente\ Consumida} = \frac{12Ah}{2.12A} = \frac{12Ah}{24A} = 0,5hr = 30min. \quad (70)$$

Sin embargo, es importante mencionar que el tiempo disponible para el manejo del vehículo depende del modo en el que se conduzca.

Con dicha tensión, se alimenta un regulador MIC2941 de 15V que suministra la tensión de alimentación para los controladores de los puentes H, un regulador LM7805 para alimentar a los microcontroladores y a las compuertas y un regulador de precisión LM2931 que alimenta los sensores del vehículo.

Finalmente, es importante mencionar que las baterías del equipo se cargan en una conexión en paralelo, utilizando un cargador universal comercial de 12V-3A. Para calcular el tiempo estimado de carga se procede de la siguiente forma:

$$tcarga = \frac{Carga\ Total}{Corriente.eficiencia} = \frac{24Ah}{3A.0,8} = 10hr \quad (71)$$

3.3.6 Interfaz

La etapa de interfaz está formada por un panel de 6 LEDs (dos verdes, dos amarillos y dos rojos), que se dispone en el manubrio del vehículo y el cual permite suministrar información acerca de los siguientes estados del equipo:

- Vehículo listo para ser conducido: es el primer mensaje que se muestra en el panel de LEDs. Éste se muestra después de encender el vehículo y una vez que se comprueba que todo está en orden, de forma que el vehículo puede ser tripulado. El mensaje consiste en el encendido progresivo de los 6 LEDs y el posterior encendido-apagado simultáneo de éstos.
- Estado de la carga restante de la batería: es el mensaje permanente que se muestra en el panel. Una vez realizado el proceso de monitoreo por el microcontrolador principal y determinado el nivel de carga restante de la batería, éste se muestra en el panel según 6 estados predefinidos, de forma que el estado 1 es “batería completamente cargada” y se indica con los 6 LEDs encendidos, y los otros 5 estados vienen dados por el apagado progresivo de los LEDs según se va descargando la batería.
- Apagar o reiniciar el vehículo: es un mensaje de alerta que se muestra al detectarse un ángulo de inclinación mayor al ángulo máximo permitido en el vehículo o al detectarse en las baterías un suministro de corriente mayor al admitido por el equipo. El mensaje consiste en encender y apagar frecuentemente dos LEDs del mismo color.

En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se presentan los diagramas esquemáticos de los diferentes circuitos que conforman el vehículo.

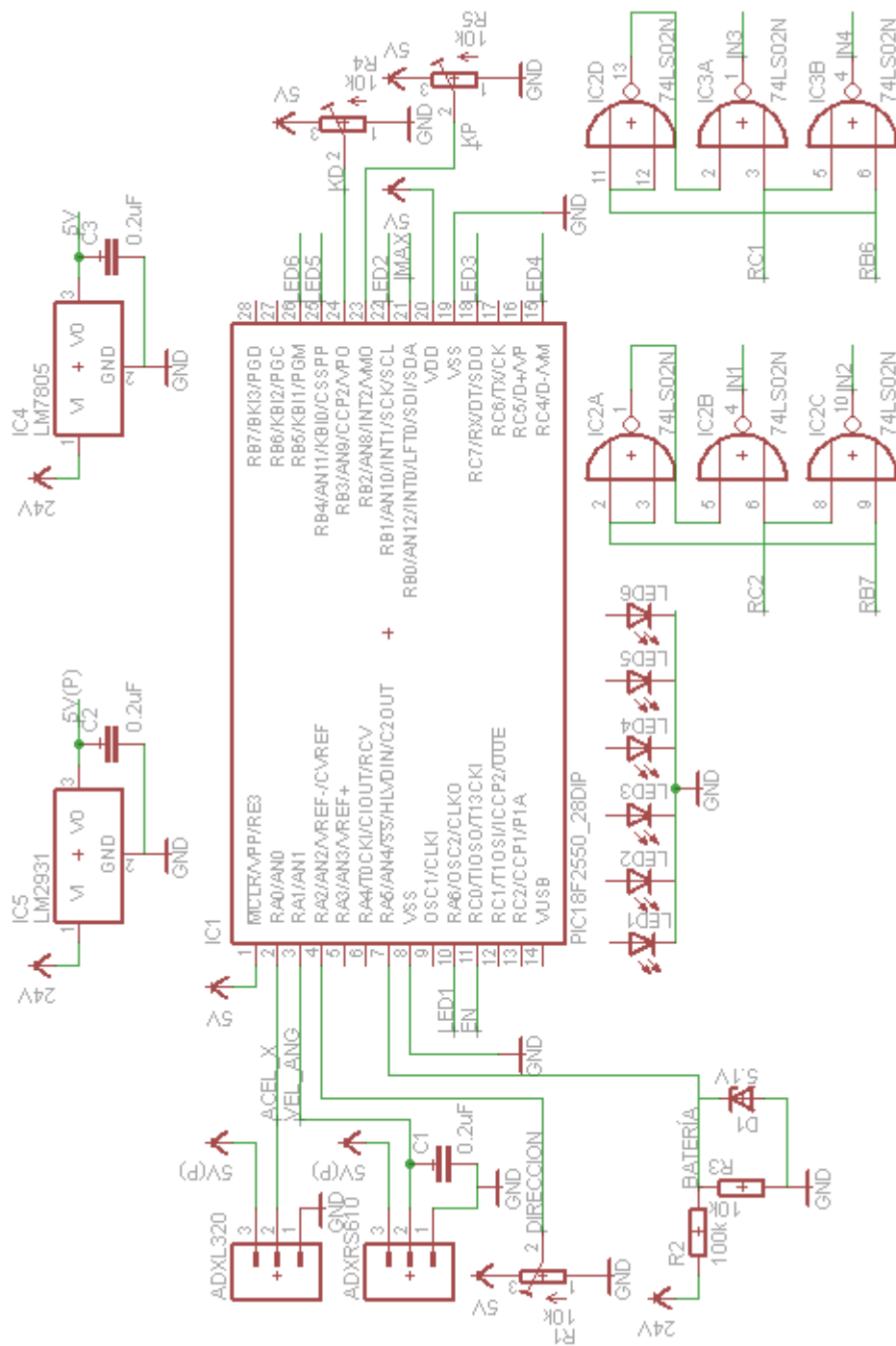


Figura 3.5. Diagrama esquemático de la etapa de control parte 1

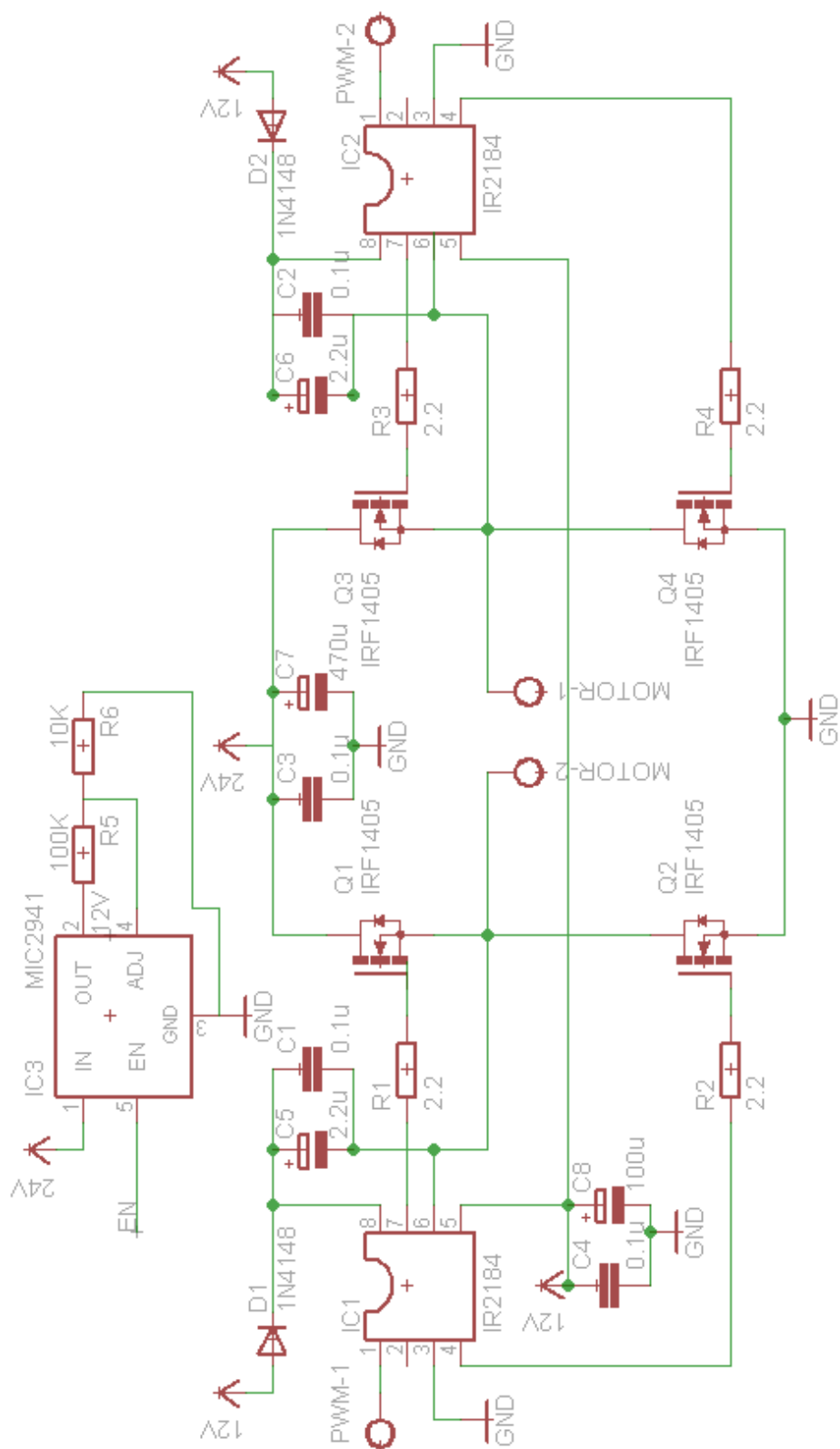


Figura 3.6. Diagrama esquemático parte 2 de la etapa de potencia

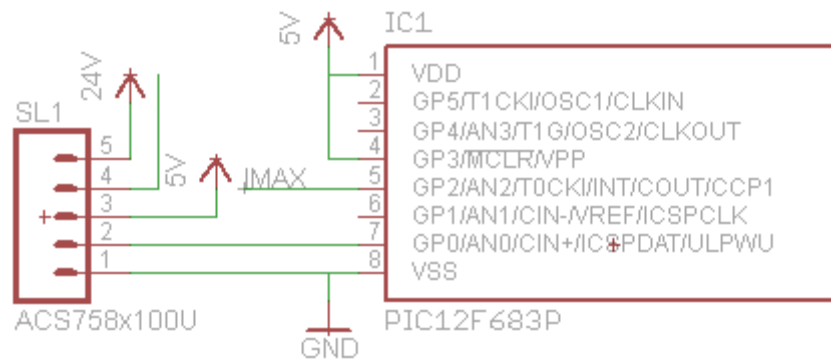


Figura 3.7. Diagrama esquemático de la etapa de control parte 2

3.3.7 Parte mecánica

Para la construcción de la estructura mecánica se tomaron decisiones de diseño que involucraran tres características importantes: elaborar una estructura robusta, fácil de construir y económicamente viable.

La plataforma donde reposa el conductor se construyó con cortes de ángulos estructurales, los cuales se soldaron estratégicamente para formar un paralelepípedo, con la finalidad de que ésta se pudiera construir fácil y directamente, sin tener que recurrir a un experto. Por otro lado, el vehículo consta de dos ruedas de bicicletas de 16 pulgadas de diámetro, las cuales se tenían disponibles.

Debido a que era necesario fijar el rache de las ruedas, de forma que éste quedara fijo con estas últimas, se recurrió a un experto para que realizara los puntos de soldadura pertinentes, ya que se trataba de una tarea bastante delicada y compleja. Así mismo, el uso de este tipo de ruedas determinó, en gran forma, que se tuvieran que utilizar cadenas para transmitir el par generado por los motores hacia las ruedas.

Para manejar el vehículo se construyó un manubrio con tubos metálicos. Este manubrio se conectó a unas chumaceras que permiten que éste gire y sea posible direccionar el vehículo. En la figura 3.8 se detallan las dimensiones del vehículo.

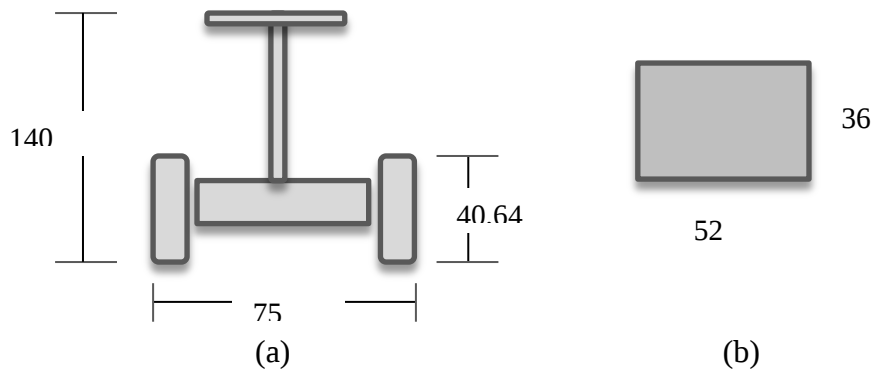


Figura 3.8. Dimensiones del vehículo. (a) Vista frontal. (b) Base donde reposa el conductor

3.4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El vehículo auto balanceado está formado por diferentes etapas funcionales, las cuales están comandadas por un microcontrolador principal, el cual actúa como el cerebro del equipo y un microcontrolador secundario encargado de realizar el monitoreo de corriente.

El uso de dichos microcontroladores hace necesario el desarrollo de un programa que se encargue de procesar distintas tareas en el equipo.

En este caso dichas tareas son:

3.4.1 Calibración

Este proceso consiste en obtener el nivel cero de los sensores que posee el vehículo. En este caso se obtiene el nivel cero del acelerómetro, el giroscopio y el potenciómetro de dirección. Dicho proceso se realiza obteniendo la conversión analógica a digital de la señal de cada sensor, dicha conversión es sumada progresivamente sesenta y cuatro (64) veces, para luego ser promediada ponderadamente. La realización del promedio ponderado previene en la medida de lo posible que el ruido pueda afectar la medición del nivel cero de los distintos sensores.

Una vez adquirido el nivel cero de los sensores, el dato es guardado en las variables pertinentes para su posterior uso.

3.4.2 Acondicionamiento de señales

Como se mencionó anteriormente la correcta medición del ángulo de inclinación y de la velocidad angular es indispensable para el correcto funcionamiento del vehículo.

Por otro lado, como se describió en el desarrollo teórico, en este tipo de sistemas, la medición del ángulo de inclinación no puede realizarse utilizando únicamente un acelerómetro o un giroscopio, si se desea una medición correcta. Razón por la cual, se implementó un filtro complementario, el cual permite estimar el ángulo de inclinación utilizando ambos sensores.

Como se describió en el desarrollo teórico, el ángulo estimado con el uso de este filtro viene dado por la ecuación (27), la cual tiene la siguiente forma:

$$\hat{\theta} = HB(s) \cdot \theta a(s) + HA(s) \cdot \theta g(s)$$

Con HB(s) y HA(s):

$$HB(s) = \frac{\tau}{s + \tau}$$

$$HA(s) = \frac{s}{s + \tau}$$

Y con HB(z) y HA(z):

$$HB(z) = \frac{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right) z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}} z^{-1}} \quad (72)$$

$$HA(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}} z^{-1}} \quad (73)$$

τ : Constante de tiempo de ambos filtros.

T : Tiempo de muestreo.

La constante de tiempo τ fija cuanto tiempo actuará cada sensor, de forma que si ésta es muy pequeña el giroscopio actúa durante poco tiempo y el efecto del ruido y la aceleración horizontal que detecta el acelerómetro se acentúa. Si por el contrario, la constante de tiempo es muy grande, el giroscopio actuará durante más tiempo y la deriva de la medición de éste podría comenzar a afectar notablemente el ángulo estimado.

Empíricamente, se probaron distintas constantes de tiempo, tomando en cuenta que dicha constante de tiempo usualmente es menor a 1s [14], obteniendo el mejor resultado para: $\tau=0,5s$.

De manera que, para el cálculo del ángulo de inclinación el giroscopio interviene entre 0 y 0,5s y para tiempos mayores a 0,5s dicho cálculo es comandado por el acelerómetro. Obteniendo, de esta forma una estimación del ángulo de inclinación bastante aceptable en todo el rango de frecuencias de trabajo.

Finalmente, la velocidad angular medida con el giroscopio y el ángulo estimado haciendo uso del filtro complementario son enviadas al sistema de control.

Por otro lado, a la variable dirección se le aplica un filtro pasabajo, para minimizar el efecto de ruido de alta frecuencia. Completando así, las tres variables usadas para calcular la salida de control.

3.4.3 Verificación del estado de las baterías

Como se mencionó anteriormente para el proceso de monitoreo de la carga restante de las baterías se aplica un divisor de tensión resistivo a la tensión de las baterías, para obtener niveles de tensión admitidas por el microcontrolador. El resultado de dicha división de tensión se conecta a una entrada analógico-digital del microcontrolador principal. De forma que, aproximadamente, cada 8s se realiza la

lectura de dicha entrada y se determina a qué nivel de carga corresponde dicha tensión.

Finalmente, se fijan, según el nivel de carga calculado, las salidas de cada uno de los pines que conforman el puerto de interfaz. En el manual del equipo se esquematizan los seis (6) niveles de carga posibles (debido a que se tienen sólo seis (6) LEDs en el panel de interfaz), que pueden presentarse en el equipo junto con sus respectivas salidas en el puerto de interfaz.

3.4.4 Sistemas de seguridad

3.4.4.1 Caso 1: Ángulo crítico

El funcionamiento de este sistema de seguridad consiste en que una vez calculado el ángulo estimado por el filtro complementario, se verifica si éste es mayor a un ángulo crítico (treinta (30) grados). De forma que si esta condición se cumple, se procede al apagado del vehículo y además, se muestra un mensaje de alerta en el panel de LEDs. El apagado del vehículo se hace por medio de un pin de salida del microprocesador principal, el cual envía una señal a la alimentación de los controladores de los puentes H para desactivar la etapa de potencia y evitar que el vehículo siga operando frente a una posible caída del conductor.

Para escoger el ángulo crítico, se midió el ángulo a partir del cual le resultara imposible al vehículo retomar el equilibrio.

3.4.4.2 Caso 2: Sobrecorriente

En este sistema de seguridad, la idea fundamental es proteger a los actuadores, que son los dispositivos eléctricos que consumen la mayor corriente en el vehículo. De manera que, se hace un monitoreo de la corriente que proporcionan las baterías y si ésta supera el valor de corriente máxima admitida en el equipo (cincuenta (50)A) se hace un apagado automático del vehículo para resguardar al sistema y se envía un mensaje de alarma al panel de LEDs.

El monitoreo de la corriente es capaz de distinguir si en el sistema se produce un ruido no deseado en la medición de la corriente, de manera de no desactivar el vehículo por error, ya que, esto puede acarrear consecuencias graves tanto para el vehículo como para el conductor.

3.4.5 Sistema de control

El sistema del vehículo auto balanceado basado en el péndulo invertido, como se demostró en el desarrollo teórico, es un sistema no lineal, de orden superior (4to orden) e inestable a lazo abierto. De forma que se plantea el desarrollo de un controlador PID para controlar el sistema. Dicho controlador admite mecanismos sencillos de sintonización y ha sido aplicado, con éxito, en una amplia gama de sistemas de control, incluyendo sistemas de péndulo invertido.

Se plantea, entonces, el desarrollo de dicho controlador con la finalidad de obtener un sistema estable que posea las siguientes características:

- Rapidez en alcanzar el objetivo de control, es decir, que el péndulo logre estabilizarse en el menor tiempo posible.
- Bajo número de oscilaciones, para garantizar que el sistema no se desestabilice.
- Oscilaciones de baja magnitud.
- Admisión de variación de masa, ya que la masa del conductor hace que el centro de masa del sistema varíe, lo que afecta el sistema de control.

En este sentido se tiene que (según la tabla 2.1 del desarrollo teórico), las partes que conforman un controlador PID tienen los siguientes efectos:

- Acción Proporcional: disminuye el tiempo de subida y el error en estado estacionario, no afecta en gran forma el tiempo de establecimiento y aumenta la magnitud de las oscilaciones.

- Acción Derivativa: no afecta en gran forma el tiempo de subida ni el error en estado estacionario, disminuye el tiempo de establecimiento y disminuye la magnitud de las oscilaciones.
- Acción Integral: disminuye el tiempo de subida, hace cero el error en estado estacionario, aumenta tanto el tiempo de establecimiento como la magnitud de las oscilaciones.

A simple vista, se podría pensar que la acción integral, no contribuiría con los requerimientos planteados para el sistema, ya que lo haría lento, aumentaría la magnitud de las oscilaciones e incrementaría el número de éstas. Sin embargo, esta acción es la que permitiría eliminar el error en estado estacionario ante una entrada constante.

No obstante, al analizar con detenimiento el sistema en su totalidad, se debe tomar en cuenta que el propio conductor forma parte del sistema de control. En pocas palabras, el humano forma parte del lazo de control, por lo que éste actuará activamente para reducir el error en estado estacionario. Y si bien para obtener resultados más precisos con el vehículo no tripulado es útil aplicar una acción integral, se tiene que en el sistema tripulado (con el humano en el lazo de control), esta acción pudiera degradar el desempeño neto del sistema de control [15]. Por estas razones, aún cuando se planteó inicialmente la implementación de un controlador PID, se decidió implementar un control PD, el cual, además, resulta más sencillo de sintonizar.

El controlador PD se implementó digitalmente utilizando el microcontrolador principal del equipo y siguiendo la ecuación (74):

$$PD = K_p \cdot (\theta + T_D \cdot \dot{\theta}) \quad (74)$$

Donde:

K_p : Constante de proporcionalidad.

T_D : Tiempo derivativo.

θ : Ángulo de inclinación (error).

$\dot{\theta}$: la velocidad angular (derivada del error).

En la figura 3.9 se presenta un diagrama de bloques del sistema de control.

Las constantes del controlador K_p y T_D se encontraron mediante el método de ajuste por ensayo y error. Inicialmente se fijó T_D en cero y se determinó con el uso del osciloscopio un valor de K_p tal que correspondiera con un ciclo de trabajo bajo en la señal PWM (sin conectar los motores), obteniéndose un $K_p = 0,5$, el cual generaba un PWM con ciclo útil menor al 10%, frente a variaciones menores a 5° en el ángulo de inclinación. Una vez fijado dicho K_p inicial, se procedió a conectar los motores y se encontró que este valor de K_p era insuficiente para alcanzar el objetivo de control, razón por la cual se procedió a aumentar el K_p , hasta obtener características de la respuesta del sistema similares a las requeridas. Posteriormente, para obtener menos oscilaciones en el proceso de búsqueda del equilibrio y obtener una respuesta más rápida se incrementó el valor de T_D .

Obteniéndose, finalmente las siguientes constantes para el controlador PD:

$$PD = 5. (\theta + 0,01. \dot{\theta})$$

Para las cuales el sistema presenta el siguiente comportamiento:

- El sistema alcanza el estado de equilibrio.
- Presenta oscilaciones cuyas magnitudes no son apreciables por el humano.
- Tiene una respuesta rápida, tomando en cuenta que es un sistema con una gran inercia (menos de 2s en alcanzar el estado de equilibrio, una vez agregada al sistema una perturbación).

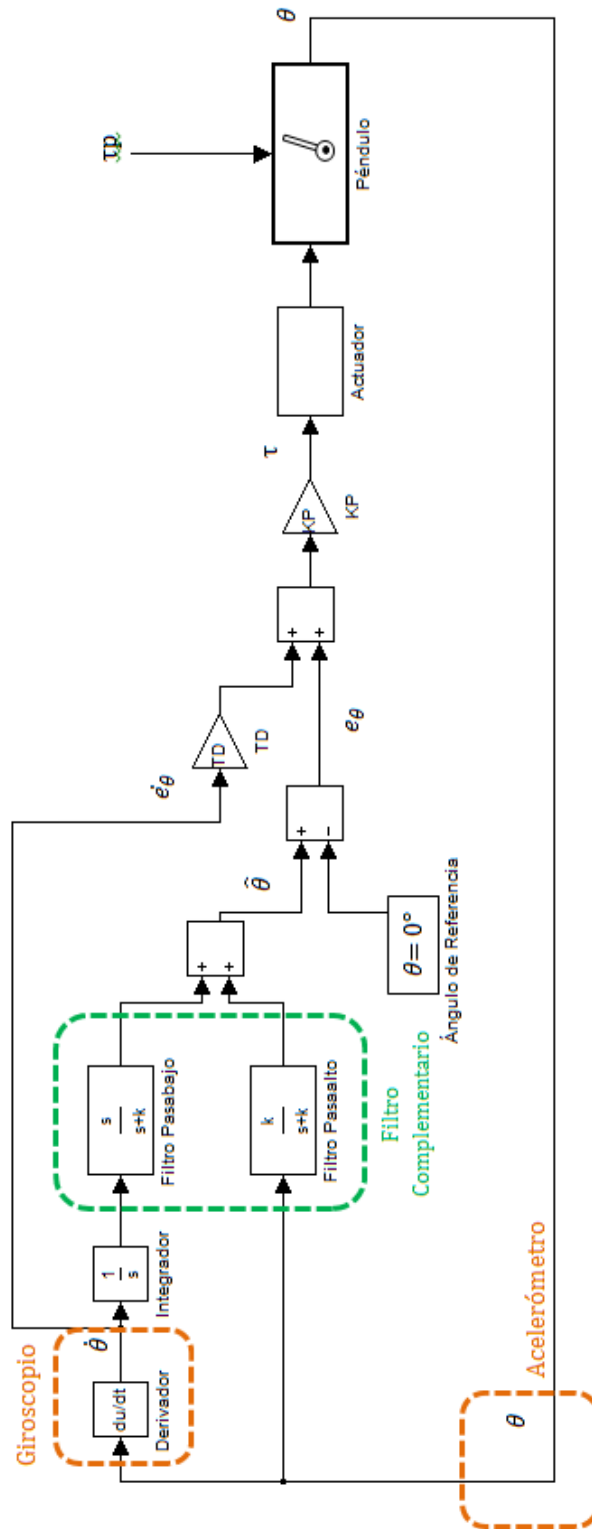


Figura 3.9. Diagrama de bloques del sistema de control

- Admite variación de masa (logrando equilibrarse y operar con una variación en el centro de masa correspondiente a una masa de conductor de 50kg y a una variación en el centro de masa correspondiente a 70kg)

En las figuras 3.10 a 3.14 se representan los diagramas de flujo de las diferentes rutinas que conforman el programa que comanda al equipo.

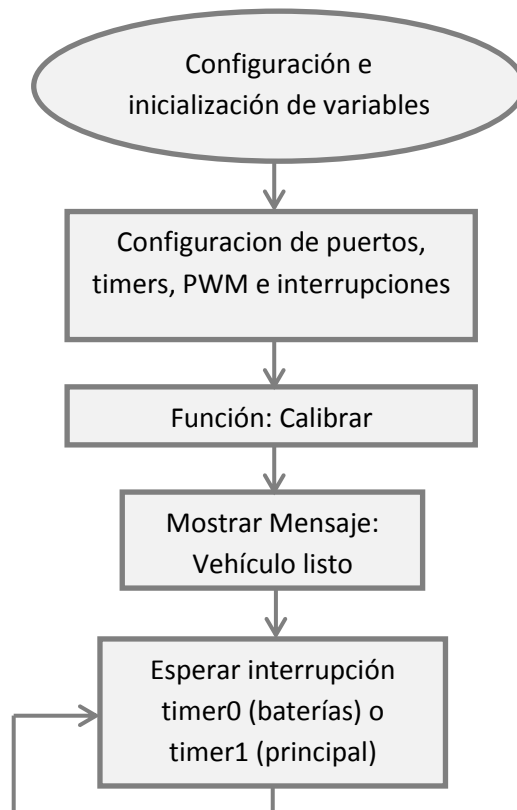


Figura 3.10. Configuración inicial microcontrolador principal

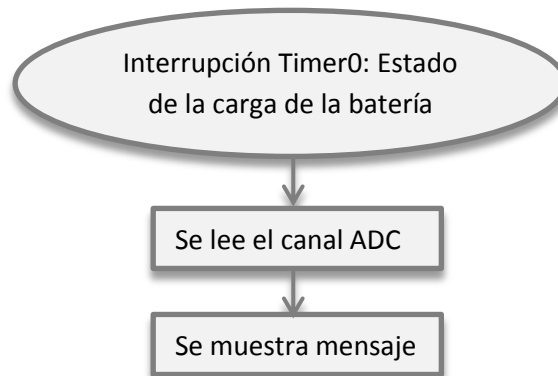


Figura 3.11. Monitoreo de la carga restante de las baterías (microcontrolador principal)

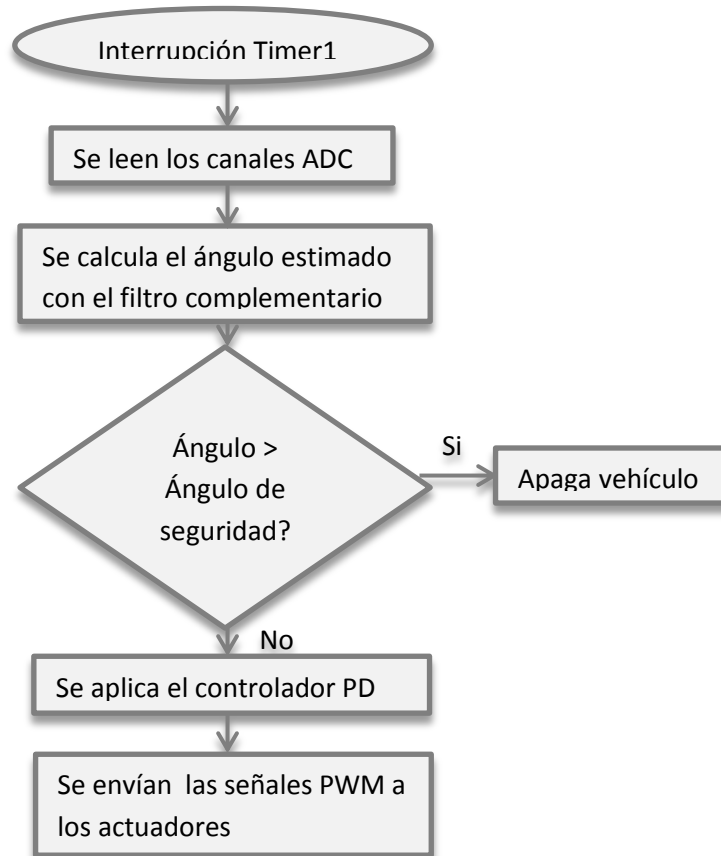


Figura 3.12. Acondicionamiento de señales, sistema de control y sistema de seguridad de ángulo crítico (microcontrolador principal)

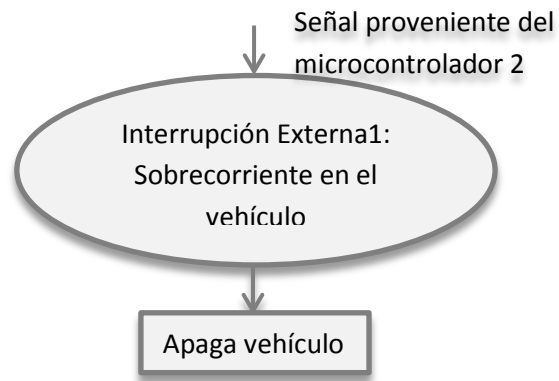


Figura3.13. Sistema de seguridad sobrecorriente (microcontrolador principal)

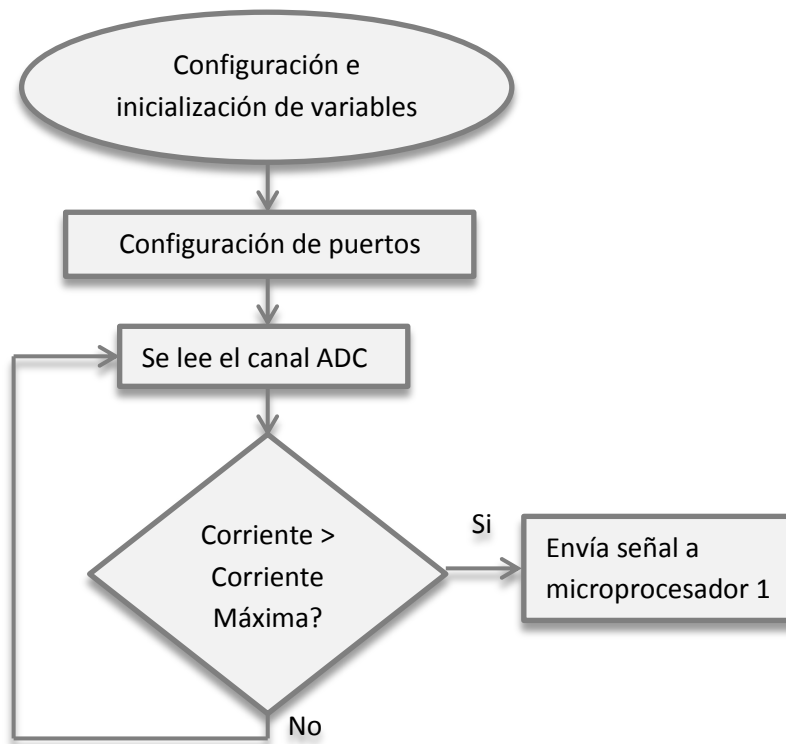


Figura 3.14. Monitoreo de corriente (microcontrolador secundario)

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE MEDICIÓN

Una vez culminado el proceso de diseño e implementación de las diferentes etapas funcionales que conforman el equipo, se procedió a realizar un conjunto de pruebas que permitieran verificar el correcto funcionamiento del prototipo en su totalidad y de las etapas que lo conforman. Dichas pruebas se describen a continuación junto con los resultados obtenidos en ellas.

4.1.1 Pruebas iniciales

En primer lugar, se procedió a probar el funcionamiento de cada etapa del equipo por separado.

De forma que se midieron las señales de salida del controlador del puente H, comprobando, que éstas proporcionaban los niveles de tensión adecuados para las compuertas de los transistores. Además, se verificó simultáneamente la correcta conmutación de los MOSFETs.

Por otro lado, se verificó el buen funcionamiento de la tarjeta de control, observando, con un osciloscopio, las diferentes señales que ésta genera.

La etapa de interfaz se probó enviando una data de prueba al panel de LEDs, encontrándose, en todo momento, una correlación entre la data enviada y el encendido y apagado de los LEDs.

Una vez comprobado el funcionamiento de cada una de las etapas, éstas se interconectaron entre sí, para estructurar el vehículo y realizar pruebas de funcionamiento general.

4.1.2 Medición del ángulo de inclinación

Con la finalidad de saber cuán exacta es la estimación del ángulo de inclinación, se realizaron mediciones del ángulo del vehículo con un transportador y se procedió a medir el ángulo estimado por el filtro complementario utilizando comunicación serial con un computador personal. Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan en la tabla 4.1.

Es importante mencionar que para realizar esta prueba se desactivó el sistema de seguridad de ángulo crítico, con la finalidad de medir ángulos entre $\pm 35^\circ$.

Tabla 4.1. Medición del ángulo usando un transportador y la salida del filtro complementario

Ángulo medido con transportador (°)	Ángulo estimado con el filtro complementario (°)	Error absoluto (°)
-35 $\pm$ 1	-31,66	3,34
-30 $\pm$ 1	-28,34	1,66
-25 $\pm$ 1	-23,93	1,07
-20 $\pm$ 1	-19,07	0,93
-15 $\pm$ 1	-14,38	0,62
-10 $\pm$ 1	-9,67	0,33
-5 $\pm$ 1	-4,55	0,45
0 $\pm$ 1	0,53	0,53
5 $\pm$ 1	5,21	0,21
10 $\pm$ 1	10,62	0,62
15 $\pm$ 1	15,25	0,25
20 $\pm$ 1	20,43	0,43
25 $\pm$ 1	25,56	0,56
30 $\pm$ 1	28,25	-1,75
35 $\pm$ 1	33,19	-1,81

Error absoluto máximo	3,34
Error absoluto mínimo	0,21
Error absoluto promedio	0,98

(Continuación de la tabla 4.1)

En la tabla 4.1 se observa que a medida que el ángulo se acerca a 30° el error, con respecto a la medición del transportador, se incrementa. Esto se debe a que la aproximación lineal aplicada para la estimación del ángulo es válida para ángulos pequeños, en este caso menores a 30° (con un error teórico máximo del 5%). En promedio se obtuvo un error de $0,98^\circ$, sin embargo este error promedio incluye la medición de ángulos por encima del límite de la aproximación lineal (30°).

En términos generales se puede decir que la estimación del ángulo realizada por el filtro complementario es bastante aceptable, ya que el error máximo arrojado para ángulos menores a 30° es de $1,07^\circ$, y para una inclinación de 25° , que es una condición extrema en el vehículo.

4.1.3 Funcionamiento del filtro complementario

Con la finalidad de observar el comportamiento del filtro complementario, que permite estimar el ángulo de inclinación del equipo, frente a diferentes variaciones angulares y con la finalidad, también, de verificar el correcto funcionamiento de dicho filtro, se procedió a construir la gráfica de las siguientes señales:

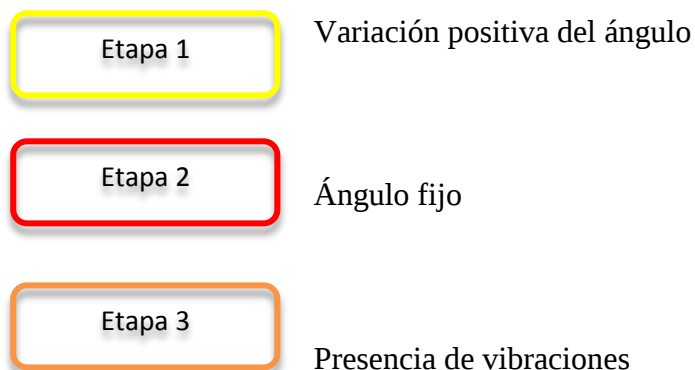
- Ángulo estimado utilizando la señal del acelerómetro.
- Ángulo estimado utilizando la señal de salida del acelerómetro y aplicando un filtro pasabajo con constante de tiempo igual a la constante de tiempo del filtro complementario.
- Ángulo estimado utilizando la señal del giroscopio.

- Ángulo estimado utilizando la señal de salida del giroscopio y aplicando un filtro pasaalto con constante de tiempo igual a la constante de tiempo del filtro complementario.
- Ángulo estimado por el filtro complementario.

De forma que una vez calculado el ángulo de inclinación para cada caso (utilizando los sensores y los filtros correspondientes), se procedió a implementar la opción de transmisión serial en el microcontrolador principal y se enviaron los datos a un computador personal para su posterior graficación. Este proceso se realizó para variaciones angulares positivas y negativas, aplicando vibraciones al equipo y para ángulos fijos.

Sin embargo, debido a limitaciones en el proceso de transmisión serial, no fue posible obtener los cinco (5) datos (ángulo estimado usando el acelerómetro, antes y después del filtro pasabajo, ángulo estimado usando el giroscopio, antes y después del filtro pasaalto y ángulo estimado con el filtro complementario) simultáneamente, razón por la cual, éstos se obtuvieron y se graficaron por separado, lo que permite, apreciar, por lo menos aproximadamente, el comportamiento del ángulo estimado en cada caso.

En las siguientes figuras (figura 4.1 a figura 4.5) se presentan los resultados obtenidos.



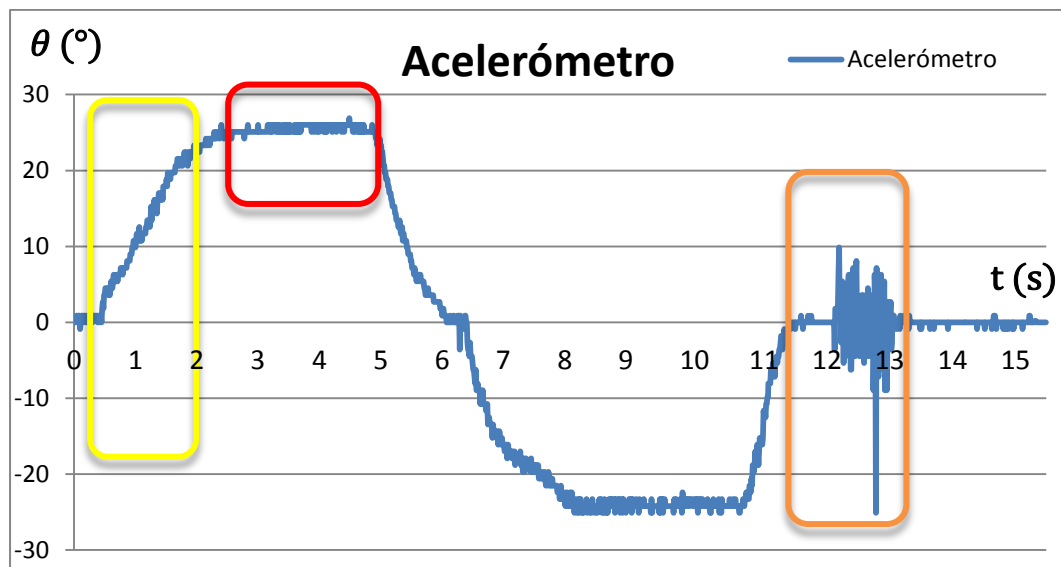


Figura 4.1. Ángulo estimado utilizando la señal del acelerómetro

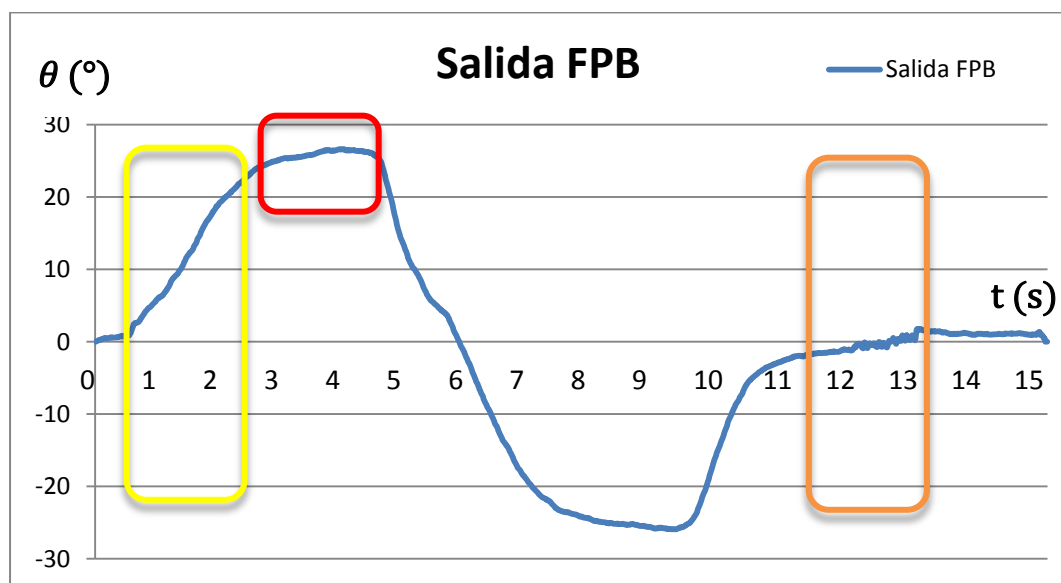


Figura 4.2. Ángulo estimado utilizando la señal del acelerómetro y aplicando un filtro pasabajo

En la figura 4.1 se aprecia que la estimación del ángulo utilizando únicamente el acelerómetro, contiene ruido, prácticamente, en todo momento, el cual alcanza amplitudes hasta de 20° , en el tramo de la gráfica en el que se generaron vibraciones en el equipo.

En la figura 4.2 se observa cómo el filtro pasabajo disminuye notablemente el ruido que presenta la medición del acelerómetro. Sin embargo, cabe destacar que el filtro pasabajo no soluciona el problema de que la salida del acelerómetro se verá afectada por la aceleración horizontal generada cuando el vehículo experimenta un cambio de velocidad. Este efecto no pudo incluirse en la prueba debido a que ésta se realizó con el vehículo detenido para poder adquirir la data con el computador personal.

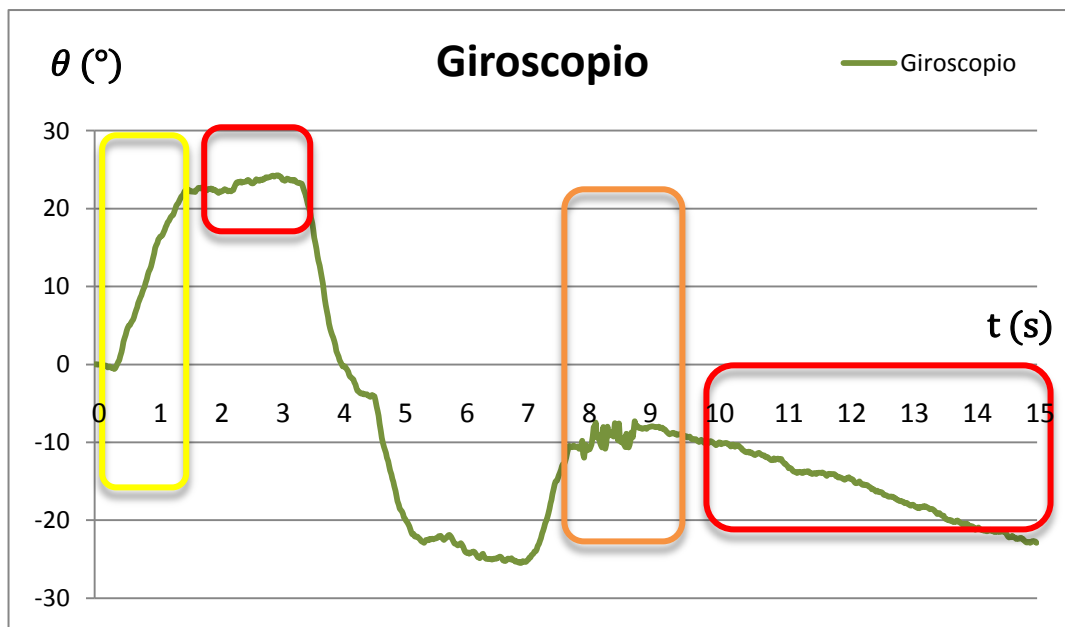


Figura 4.3. Ángulo estimado utilizando la señal del giroscopio

En la figura 4.3 se aprecia como el giroscopio realiza una buena estimación del ángulo de inclinación en las etapas en las que éste no permanece fijo (ver etapa 1 de la figura 4.3). Se observa, además, que el ángulo estimado con el giroscopio también varía en la etapa de vibraciones (etapa 3), pero estas variaciones son menores a las presentadas por la medición del acelerómetro. Por otro lado, para una inclinación fija, el ángulo estimado por el giroscopio crece constantemente, debido a la deriva que se genera por el proceso de integración de la velocidad angular (ver etapa 2 de la figura 4.3). Dicha deriva, teóricamente, crece indefinidamente y afecta cada vez, en mayor grado, la medición del ángulo.

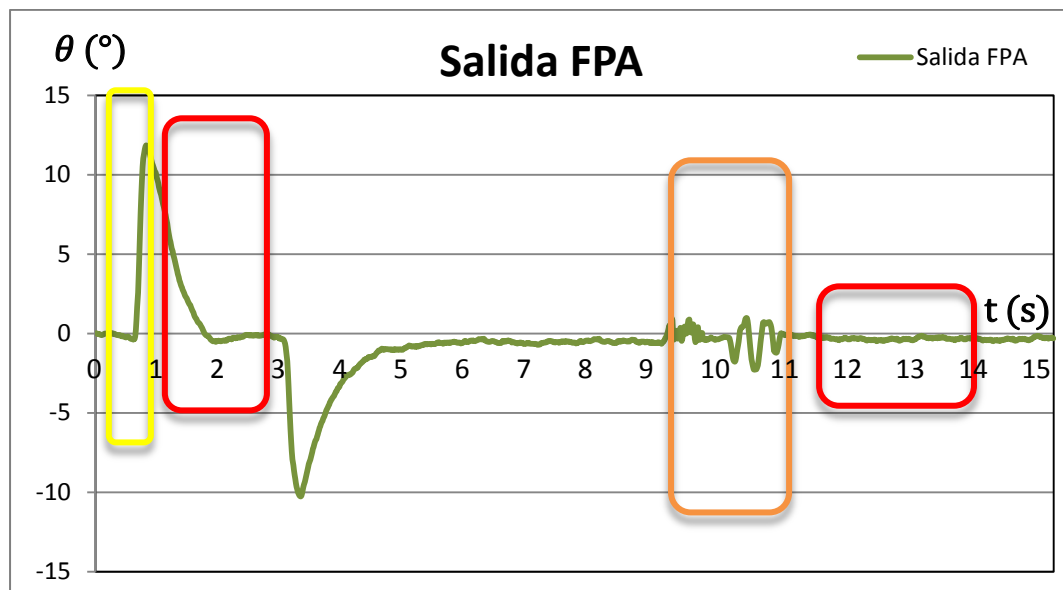


Figura 4.4. Ángulo estimado utilizando la señal del giroscopio y aplicando un filtro pasaalta

En cuanto a la figura 4.4 se tiene, que al aplicar el filtro pasaalto al ángulo estimado con el giroscopio se soluciona el problema de la deriva, sin embargo, el filtro aplaca la señal en su totalidad en las etapas en las que se tiene una inclinación fija. Por lo tanto a bajas frecuencias no se podría medir el ángulo de inclinación.

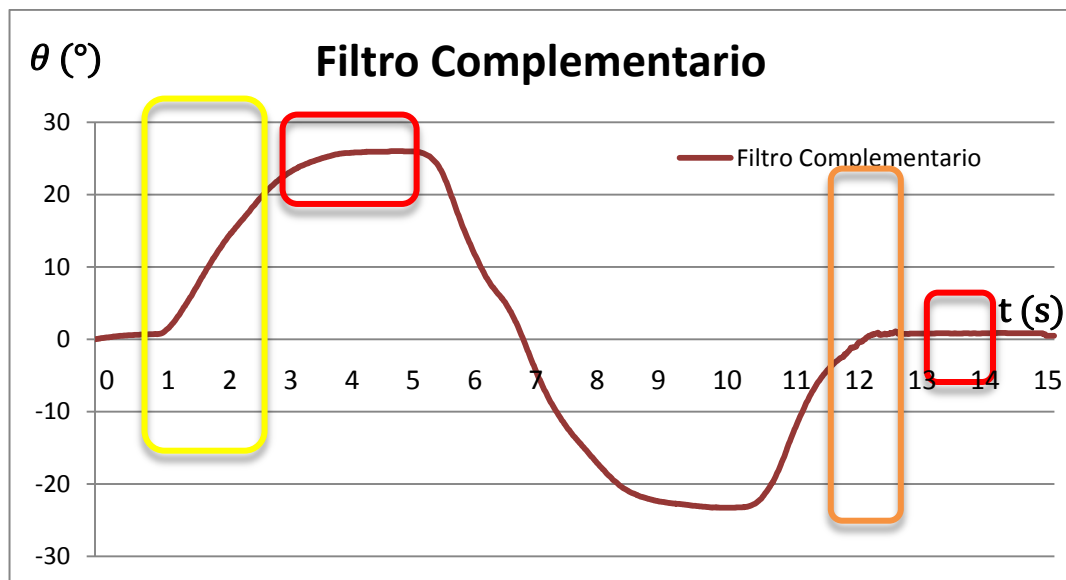


Figura 4.5. Ángulo estimado aplicando el filtro complementario

Finalmente, en la figura 4.5 se presenta la señal de ángulo estimada al aplicar el filtro complementario. En dicha figura se aprecia que el ruido del acelerómetro es aplacado, la deriva generada en el proceso de integración de la señal del giroscopio es eliminada y que el uso de ambos sensores junto con la adición de un filtro complementario arroja una estimación del ángulo bastante aceptable en todas las etapas de la prueba, es decir, variación positiva y negativa del ángulo, presencia de vibraciones y ángulos fijos (lo que se corrobora con la tabla 4.1, presentada en la prueba anterior).

4.1.4 Sistema de seguridad de ángulo crítico y de sobrecorriente

Estas pruebas se realizaron con la finalidad de verificar la correcta activación de los sistemas de seguridad.

Para el sistema de seguridad de ángulo crítico se procedió a inclinar el equipo (montado previamente en una plataforma que permitiera el libre movimiento de las ruedas) y a medir el ángulo de inclinación y la alimentación de los controladores del puente H y a observar las señales PWM. Obteniéndose, que al inclinar el vehículo con un ángulo ligeramente mayor al ángulo crítico, tanto las señales PWM como la alimentación de los controladores del puente H son apagadas, y que el mensaje de alerta es mostrado en el panel de LEDs, comprobándose así el funcionamiento de este sistema de seguridad.

Para el sistema de seguridad de sobrecorriente se procedió de la misma forma que para la prueba descrita en el párrafo anterior, pero en este caso se utilizó un potenciómetro como dispositivo auxiliar, para generar cambios en la entrada analógico-digital del microcontrolador secundario que simularan variaciones en la corriente del equipo. En esta prueba se obtuvo que para valores en la entrada del microcontrolador secundario correspondientes a corrientes mayores a la corriente máxima admitida por el equipo, dicho microcontrolador envía la señal de alarma pertinente al microcontrolador principal, el cual genera el apagado de las señales

PWM y de la alimentación de los controladores del puente H, y envía el mensaje de alerta al panel de LEDs.

4.1.5 Pruebas de la etapa de potencia

Con la finalidad de comprobar la correcta conmutación de los MOSFETs y de verificar el funcionamiento de los controladores del puente H se procedió a registrar la forma de onda de la señal PWM proporcionada por el microcontrolador, de la salida de las compuertas lógicas NOR, de la salida de los controladores del puente H (compuertas de los MOSFETs) y de la señal en los motores del vehículo. Este procedimiento se realizó para bajo, medio y alto PWM y una tensión de alimentación en los motores de 12V. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, de la figura 4.6 a la figura 4.20.

Es importante mencionar que para realizar estas pruebas se montó el vehículo en una base, para garantizar poco consumo de corriente en los motores, sobre todo en la prueba en la que se utilizó un ciclo de trabajo del 95%. Además, se debe recordar que las señales PWM se invierten en el microcontrolador principal con la finalidad de obtener la lógica de control deseada.

PWM Bajo

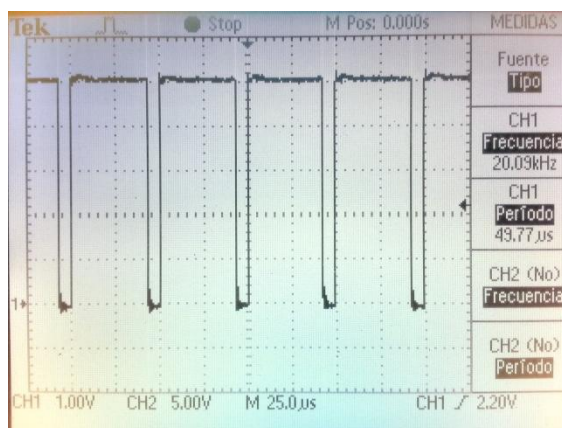


Figura 4.6. Salida PWM del microcontrolador principal

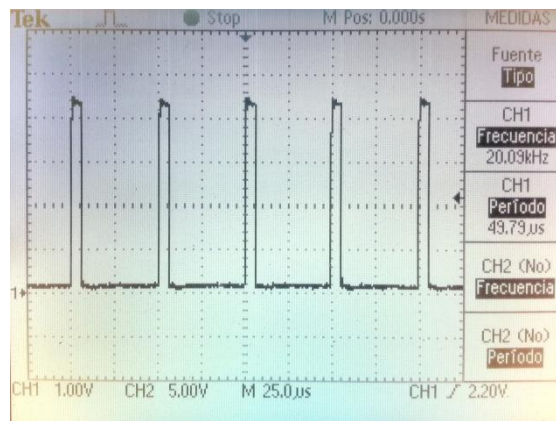


Figura 4.7. Salida de la compuerta NOR

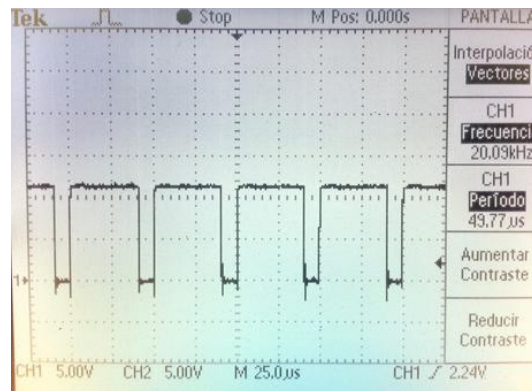


Figura 4.8. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H

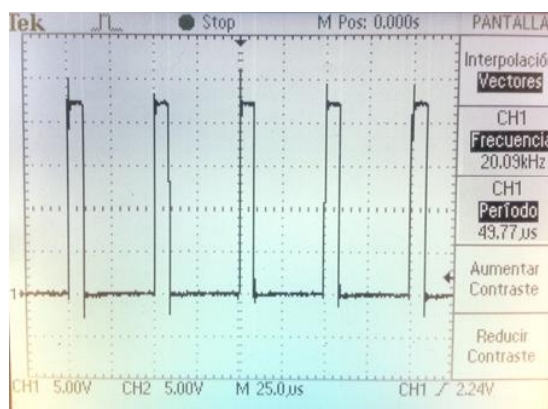


Figura 4.9. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H

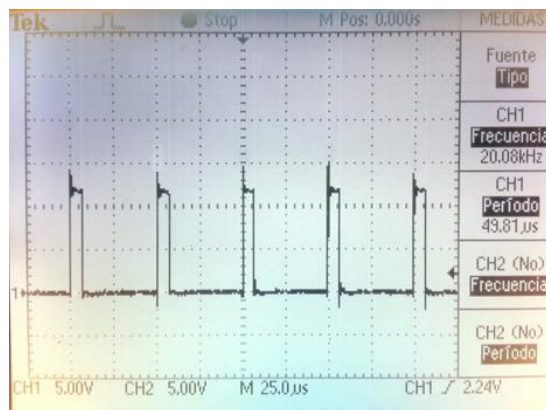


Figura 4.10. Señal en el motor

PWM Medio

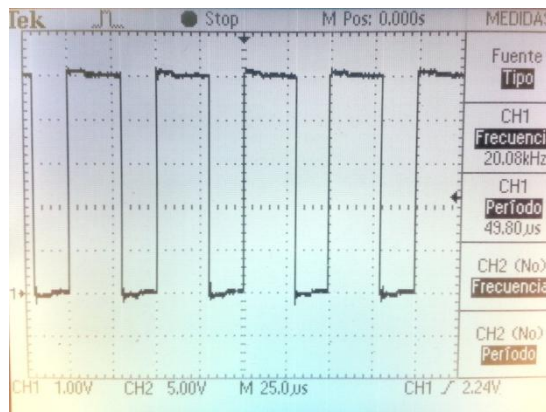


Figura 4.11. Salida PWM del microcontrolador principal

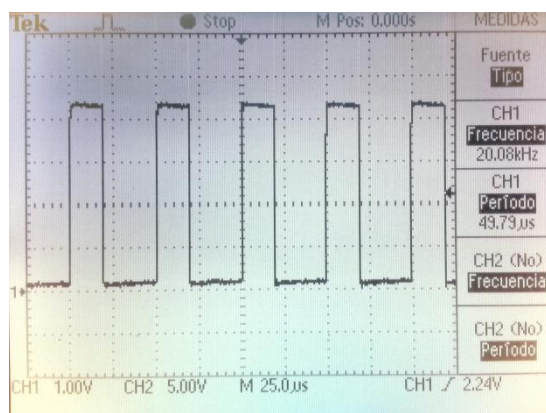


Figura 4.12. Salida de las compuerta NOR

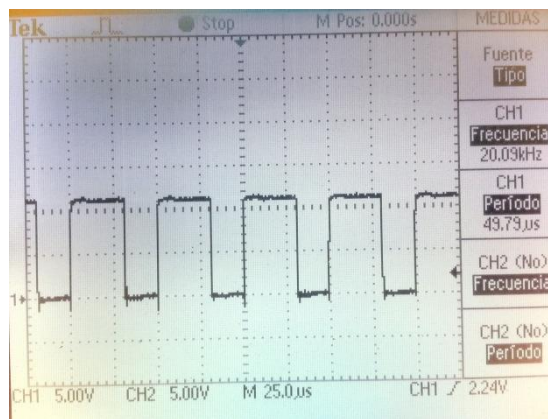


Figura 4.13. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H

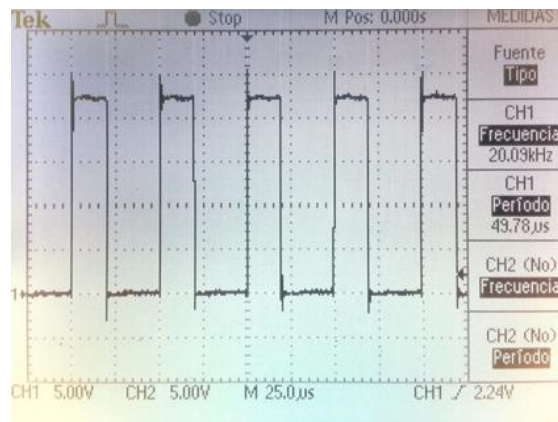


Figura 4.14. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H

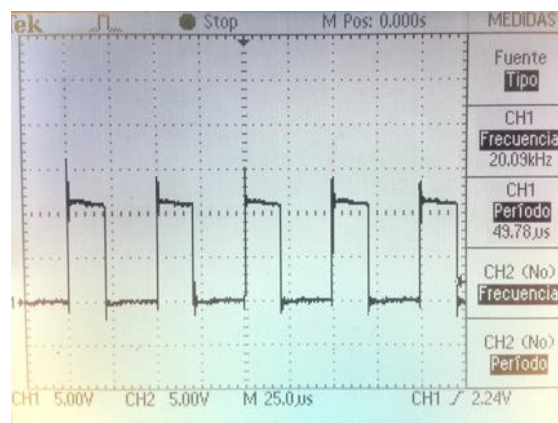


Figura 4.15. Señal en el motor

PWM alto

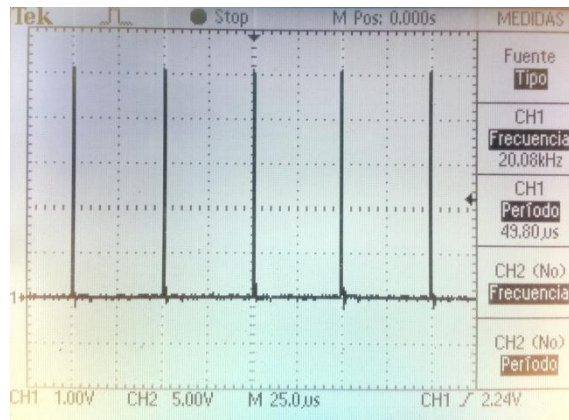


Figura 4.16. Salida PWM del microcontrolador

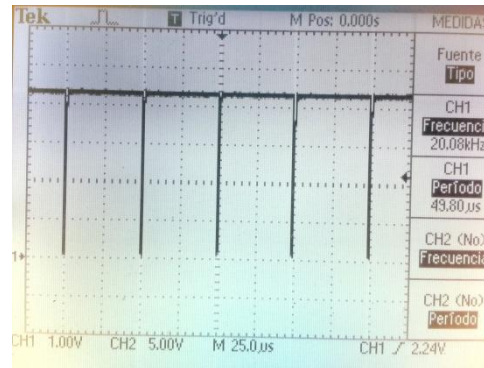


Figura 4.17. Salida de la compuerta NOR

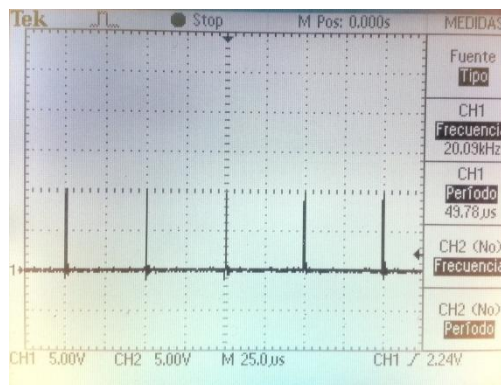


Figura 4.18. Señal en la compuerta del transistor inferior del puente H

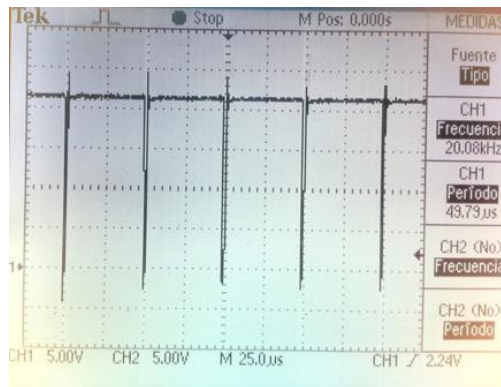


Figura 4.19. Señal en la compuerta del transistor superior del puente H

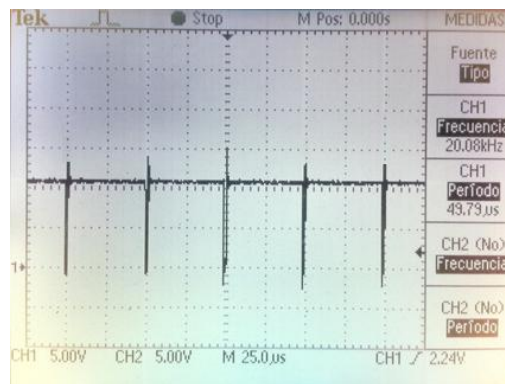


Figura 4.20. Señal en el motor

De las formas de onda registradas se puede decir, en primer lugar, que se comprobó la correcta y rápida conmutación de los MOSFETs en los tres casos (bajo, medio y alto PWM), con lo que se comprobó, también, que el controlador del puente H envía las señales adecuadas a las compuertas de los MOSFETs. Particularmente, se comprueba la correcta escogencia de los dispositivos del circuito de “bootstrap” del controlador IR2184, ya que la carga y descarga del condensador de “bootstrap” permite suministrar la tensión necesaria para conmutar los transistores superiores del puente.

En las gráficas 4.8, 4.9, 4.10, 4.13, 4.14, 4.15, 4.18, 4.19 y 4.20 se observa también, la presencia de picos de tensión, no mayores a 5V, en las señales de las

compuertas de los transistores y en el motor, los cuales son generados por la conmutación de los transistores y la liberación de la energía del motor, respectivamente y las cuales resultan manejables tanto por los transistores como por el motor.

4.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Las primeras pruebas de funcionamiento se realizaron fijando una masa de 5kg a la plataforma. Con esta masa se comprobó que el sistema de control operaba correctamente, ya que el equipo era capaz de mantener el equilibrio aun cuando se le aplicaban perturbaciones de par que generaban desviaciones angulares al sistema. (ver anexo 2).

Posteriormente, se realizaron las pruebas de funcionamiento del vehículo como tal. Para ello se conectó el manubrio a la plataforma para que éste pudiera ser tripulado por una persona. Una vez conectado el manubrio se encendió el vehículo y a continuación se subió una persona a la plataforma, la cual poseía una masa, aproximadamente, de setenta (70) kilos. La prueba consistió en maniobrar el vehículo en todos los sentidos posibles, es decir, mover el vehículo hacia adelante, hacia atrás y hacia los lados.

Los resultados de estas pruebas fueron que, el vehículo puede acelerar, frenar y girar de forma aceptable, aún cuando se presentan inconvenientes proporcionados por la parte mecánica del equipo, principalmente por diferencias entre las ruedas. Debido, también, a dichos inconvenientes mecánicos se produce un sonido indeseado al manejar el vehículo.

En términos generales, el vehículo opera adecuadamente y según los requerimientos planteados. Tomando en cuenta que, como se dijo anteriormente el conductor forma parte del sistema y éste interviene activamente en el desempeño del vehículo.

CONCLUSIONES

Después de realizar el proceso de investigación bibliográfica, analizar los aspectos teóricos pertinentes, realizar e implementar los distintos diseños y ejecutar las diferentes pruebas de medición y funcionamiento se han llegado a las siguientes conclusiones:

El filtro complementario permitió estimar el ángulo de inclinación a través de la medición del acelerómetro y del giroscopio, las cuales que exhibían ruido en diferentes rangos de frecuencia.

Los puentes H permitieron controlar el giro en ambos sentidos de los motores de corriente continua utilizados, así como su encendido, apagado y frenado.

Los controladores integrados para puentes H, permitieron realizar la lógica de control de los puentes H de forma práctica y sencilla, y garantizaron, gracias al correcto diseño de su circuitería asociada, la conmutación de los transistores de los puentes H.

Los transistores MOSFETs fueron una buena opción como conmutadores de los puentes H ya que proporcionaron una rápida conmutación y permitieron entregar una gran cantidad de la energía a los motores.

La etapa de potencia de un vehículo auto balanceado fue de suma importancia, y determinó en gran forma el buen desempeño del vehículo, con lo que se comprobó su correcto diseño y dimensionamiento eléctrico.

La selección de motores de corriente continua de imán permanente, fue una buena opción para el desarrollo del vehículo, ya que permitieron el uso de baterías recargables y realizaron adecuadamente su función de enviar la señal de control a los elementos finales de control (las ruedas).

El sistema de vehículo auto balanceado es un sistema no lineal e inestable a lazo abierto, éste pudo ser controlado aplicando un controlador proporcional derivativo.

La sintonización del controlador proporcional derivativo implementado fue un proceso delicado, que demandó paciencia y cuidado porque se comprometía la integridad del vehículo, pero permitió optimizar el sistema de control según los requerimientos planteados.

La construcción mecánica del vehículo auto constituyó un proceso complicado que requirió de sumo cuidado y de cálculos geométricos que determinaron notablemente el desempeño final del vehículo, y que además intervinieron, activamente, en el proceso de control del vehículo.

La implementación del manual de instrucciones proporcionó una guía práctica para el conductor, haciendo que fuera más fácil el proceso de encendido, apagado y manejo del vehículo.

RECOMENDACIONES

En versiones futuras del vehículo se podrían incorporar las siguientes recomendaciones:

- Mejorar la robustez de la parte mecánica, de manera que ésta pueda soportar tripulantes con mayor masa (más de 70kg).
- Utilizar otro tipo de ruedas para evitar el uso de cadenas, eliminando el sonido indeseado presente al conducir el vehículo y minimizando la posibilidad de que el sistema de control se vea afectado.
- Agregar una caja de velocidades con al menos dos cambios para optimizar el uso de la energía, proporcionando mayor velocidad o mayor torque, según el caso.
- Agregar una circuitería que permita utilizar los motores como generadores, en determinados momentos del recorrido, para aprovechar la energía mecánica y convertirla en energía eléctrica, para su posterior uso.
- Utilizar un microcontrolador más potente con la finalidad de hacer cálculos no lineales de manera rápida y eficiente, pudiendo, así, implementar mejoras en el sistema de control.
- Incluir otros sistemas de seguridad, por ejemplo incorporar el uso de dos sensores de corriente, uno para cada motor, con la finalidad de regular la velocidad de forma independiente, en caso de ser necesario.
- Dotar el vehículo con baterías de una tecnología superior que permitan tener una mayor autonomía y un menor tiempo de carga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Madero., Vicente. *Análisis y Control de Un Vehículo Basado en Péndulo Invertido*, (Tesis).- -Sevilla: Universidad De Sevilla, (2009). [en línea]. <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70099/direccion/Trabajo+Fin+de+Master+-+Vicente+Madero%252F>>. p. 59-61.
- [2] Navarro., Héctor. *Instrumentación Electrónica Moderna*, (Libro). --Caracas: Venezuela. Ed. Innovación Tecnológica, (1995). p. 62-65.
- [3] Klan., Robert; Baerveldt., Albert-Jan. *A Low-Cost and a Low-Weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter*, (Artículo). Suecia. (2007). [en línea]. <<http://www.geology.smu.edu/dpa-www/robo/balance/inertial.pdf>> p. 392-393.
- [4] Ogata., Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*, (Libro). 4ta Edición.-- Madrid: España: Ed. Pearson Prentice Hall, (2003), p.681.
- [5] Núñez., Fernando. *Control de Movimiento Empleando Labview, un Enfoque Didáctico*, (Tesis). --Puebla: Universidad de las Américas Puebla, (2007). [en línea]. <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf> p. 14-15.
- [6] Kuo., Benjamín. *Sistemas de Control Automático*. (Libro). 7ma Edición. -- México: Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, (2003), p. 177
- [7] Energía Alternativa de México. Baterías. [en línea]. <<http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch05.pdf>>. p. 1.
- [8], [9], [12], [13] Thomas., Justin. *LiFePO₄ Batteries: A Breakthrough For Electric Vehicle*, (Artículo). --Estados Unidos (2008). [en línea]: <<http://www.metaefficient.com/rechargeable-batteries/innovative-lifepo4-batteries-electric-vehicles.html>> p.1.

[10] M2 Power Lithium Energy Systems. Lithium Iron Phosphate (LIFEPO4). [en línea]. < <http://www.lifepo4.info/lifepo4.html> >. p. 1.

[11] Globe Light & Water Systems Inc. Baterías FAQ para LIFEPO. [en línea]. < <http://www.globelws.com/es/baterias-faq-para-lifepo4.html>>. p. 1.

[14] Pedreira., Carlos, Zambrano. *Modeling, Control and Automatic Code Generation for a Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle Using Modelica*, (Tesis). -- Suiza: Lund University, (2011). [en línea]. <http://www.control.lth.se/documents/2011/5884_pop.pdf> p. 36-38.

[15] D., Caldecott; A., Edwards; M., Haynes; M., Jerbic; A., Kadis; R., Madigan; Z., Prime; B., Cazzolato. *Modelling, simulation and control of an electric unicycle*, (Tesis). --Australia: Universidad de Adelaide, (2010). [en línea]. <http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2010/Micycle/micycleACRA_Rev2.0.pdf> p. 5-6.

BIBLIOGRAFÍAS

Acelerómetro ADXL320 (hoja de características técnicas) Analog Devices, (2007), Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.

Acumuladores Duncan. [en línea]. < <http://www.duncan.com.ve/>>. [Consulta:2012].

AN-978A (nota de aplicación). Internacional Rectifier. HV Floating MOS-Gate DriverDriver ICs, (2003).

AN-6005 (nota de aplicación). Fairchild. Synchronous buck MOSFET loss calculations with Excell model, (2006).

Arrieta., Simón, (Tesis). Diseño y Construcción de un Cargador de Baterías. – Caracas: Universidad Central de Venezuela, (2011).

Controlador de semipunto IR2184 (hoja de características técnicas) International Rectifier, (2006), El Segundo, California 90245, U.S.A.

D., Caldecott; A., Edwards; M., Haynes; M., Jerbic; A., Kadis; R., Madigan; Z., Prime; B., Cazzolato. *Modelling, simulation and control of an electric unicycle*, (Tesis). –Australia: Universidad de Adelaide, (2010). [en línea]. <http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2010/Micycle/micycleACRA_Rev2.0.pdf>. [Consulta: 2012].

Diodo 1N4148 (hoja de características técnicas) NXP Semiconductor, (2004), The Netherlands.

DT 98-2A. Nota de Aplicación de International Rectifier. Bootstrap Component Selection For Control ICs, 04/09/2001.

Electrical Machines I. Testing of DC Machine. [en línea]. < http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical_Machines_I/pdfs/2_9.pdf>. [Consulta: 2012].

Energía Alternativa de México. Baterías. [en línea]. <<http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch05.pdf>>. [Consulta: 2012].

Fraile., Mora. Máquinas Eléctricas, (Libro). 5ta Edición. –Madrid: Espana. Ed. Mc Graw Hill, (2003).

Giroscopio ADXRS610 (hoja de características técnicas) Analog Devices, (2007), Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.

Globe Light & Water Systems Inc. Baterías FAQ para LIFEP0. [en línea]. <<http://www.globelws.com/es/baterias-faq-para-lifepo4.html>>. [Consulta: 2012].

Introducción a la Formulación Lagrangiana y Hamiltoniana. [en línea]. <<http://ocw.uv.es/ciencias/2/1-2/112733mats50.pdf>>. [Consulta: 2012].

Kamíner., Isaac; Pascoal., Antonio; Oliveira., Paulo. *Navigation System Design Using Time-Varying Complementary Filters*. – EN: IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System. – Vol. 36. N°4 (2000).

Klan., Robert; Baerveldt., Albert-Jan. *A Low-Cost and a Low-Weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter*, (Artículo). Suecia. (2007). [en línea]. <<http://www.geology.smu.edu/dpa-www/robo/balance/inertial.pdf>>. [Consulta: 2012].

Kuo., Benjamín. *Sistemas de Control Automático*. (Libro). 7ma Edición. --México: Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, (2003).

M2 Power Lithium Energy Systems. Lithium Iron Phosphate (LIFEP04). [en línea]. <<http://www.lifepo4.info/lifepo4.html>>. [Consulta: 2012].

Madero., Vicente. *Análisis y Control de Un Vehículo Basado en Péndulo Invertido*, (Tesis).- -Sevilla: Universidad De Sevilla, (2009). [en línea]. <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70099/direccion/Trabajo+Fin+de+Master+-+Vicente+Madero%252F>>. [Consulta: 2012].

Modular Circuits. H Bridge. [en línea]. < <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/old-h-bridge-secrets/part-1/>>.

[Consulta: 2012]

Micontrolador 18F2550 (hoja de características técnicas) Microchip, (2004), Alpharetta, GA, U.S.A.

Micontrolador 12F683 (hoja de características técnicas) Microchip, (2007), Duluth, GA, U.S.A.

Mila., J. *Diseño de Equipo Electrónico*, (Libro). – Caracas: Venezuela, (2003).

Motor de CC. Generalidades. [en línea]. < http://www-app.etsit.upm.es/departamentos/teat/asignaturas/lab-ingenel/motoresdeccdeimanpermanente_v5.pdf >. [Consulta: 2012]

Navarro., Héctor. *Instrumentación Electrónica Moderna*, (Libro). --Caracas: Venezuela. Ed. Innovación Tecnológica, (1995).

Núñez., Fernando. *Control de Movimiento Empleando Labview, un Enfoque Didáctico*, (Tesis). --Puebla: Universidad de las Américas Puebla, (2007). [en línea]. <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf>.

[Consulta: 2012].

Ogata., Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*, (Libro). 4ta Edición.-- Madrid: España: Ed. Pearson Prentice Hall, (2003).

Pedreira., Carlos, Zambrano. *Modeling, Control and Automatic Code Generation for a Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle Using Modelica*, (Tesis). --Suiza: Lund University, (2011). [en línea]. <http://www.control.lth.se/documents/2011/5884_pop.pdf>. [Consulta: 2012].

Regulador de tensión LM2931 (hoja de características técnicas) MICREL, (2007), San Jose, CA 95131, U.S.A.

Regulador de tensión MIC2941 (hoja de características técnicas) ON Semiconductor, (2011), Denver, Colorado, 80267, U.S.A.

Rivera., Carlos, (Artículo). *Diseño de un Equipo Electrónico para la Medición en Tres Ejes de las Vibraciones de un Objeto.* – Caracas: Universidad Central de Venezuela, (2010).

Sensor de corriente ACS758-100U (hoja de características técnicas) Allegro, (2011), Worcester, Massachussets 01915-0036, U.S.A.

Thomas., Justin. *LiFePO4 Batteries: A Breakthrough For Electric Vehicle*, (Artículo). --Estados Unidos (2008). [en línea]: <<http://www.metaefficient.com/rechargeable-batteries/innovative-lifepo4-batteries-electric-vehicles.html>>. [Consulta: 2012].

Tutorial del Motor CC. [en línea]. <<http://www.motorbrushless.es/documentos/tutorial-motor-dc.pdf>>. [Consulta: 2012].

Transistor MOSFET IRF1405 (hoja de características técnicas) International Rectifier, (2003), El Segundo, California 90245, U.S.A.

ANEXOS

Anexo 1: Manual de Instrucciones

- Dimensiones del vehículo.

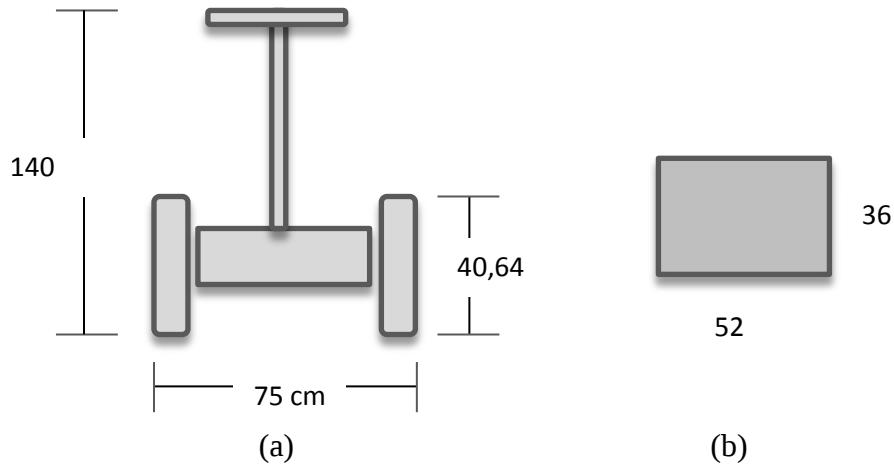


Figura 1. Dimensiones del vehículo. (a) Vista frontal. (b) Base donde reposa el conductor

- Como encender el vehículo

Para encender el vehículo correctamente se deben seguir los siguientes pasos:

1. Colocar el manubrio en posición vertical (de forma que la base donde reposa el conductor quede horizontal).
2. Pulsar el interruptor de encendido/apagado ubicado en la parte trasera de la base donde reposa el conductor, manteniendo la posición vertical del manubrio.
3. Esperar el mensaje que indica que el vehículo está listo para ser tripulado (ver sección de mensajes del panel).
4. Una vez mostrado el mensaje de “vehículo listo”, el vehículo puede ser tripulado.

- Como subirse al vehículo

Una vez encendido el vehículo se deben seguir los siguientes pasos, **tomando en cuenta que no debe inclinarse el manubrio en esta etapa, es decir, este debe permanecer en posición vertical:**

1. Tomar el manubrio con ambas manos.
2. Subir un pie a la base del vehículo.
3. Subir el otro pie de una manera natural, como si se estuviera subiendo una escalera (para evitar el desbalance que se generaría si este paso se hiciera de forma lenta).

- Cómo manejar el vehículo

Una vez tripulado el vehículo se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones al momento de manejarlo:

1. Inclinarse el manubrio hacia adelante para avanzar.
2. Aumentar la inclinación (hacia adelante) del manubrio si se desea una mayor velocidad, tomando en cuenta que esta inclinación no puede superar los 30°.
3. Si se está avanzando y se desea frenar, se debe inclinar el manubrio hacia atrás.
4. Para retroceder, se debe inclinar el manubrio hacia atrás.
5. Si se desea aumentar la velocidad en retroceso, se debe aumentar la inclinación (hacia atrás) del manubrio, tomando en cuenta que esta inclinación no puede ser mayor a 30°.
6. Para girar hacia la derecha se debe girar el manubrio hacia la derecha. A mayor giro del manubrio se tendrá una mayor velocidad de giro.
7. Para girar hacia la izquierda se debe girar el manubrio hacia la izquierda. A mayor giro del manubrio se tendrá una mayor velocidad de giro.

- Cómo bajarse del vehículo

Para bajarse del vehículo se deben seguir los siguientes pasos, **tomando en cuenta que no debe inclinarse el manubrio en esta etapa, es decir, este debe permanecer en posición vertical:**

1. Bajar un pie de la plataforma de forma natural.
2. Seguidamente bajar el otro pie.

- Cómo apagar el vehículo

Una vez que el conductor se ha bajado del vehículo se deben realizar los siguientes pasos para realizar el apagado:

1. Colocar el manubrio en posición vertical (de forma que la base donde reposa el conductor quede horizontal).
2. Pulsar el interruptor de encendido/apagado ubicado en la parte trasera de la base donde reposa el conductor, manteniendo la posición vertical del manubrio.

- Mensajes posibles en el panel de LEDs.

En el panel de LEDs se muestran los siguientes mensajes:

1. Vehículo listo para tripular: Se muestra el encendido y el apagado progresivo de los seis (6) LEDs y el posterior encendido simultaneo de todos los LEDs.
2. Estado de la carga restante de las baterías: Se muestra la carga restante de la batería según los siguientes seis (6) estados.



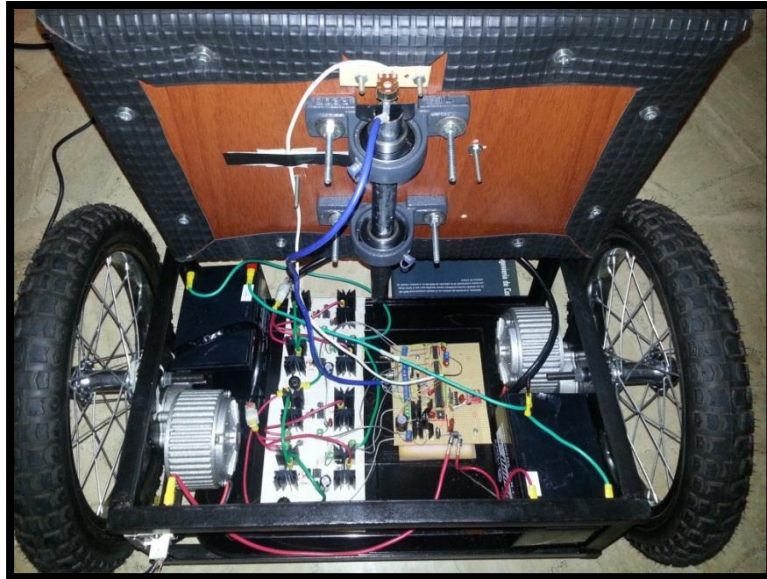
Figura 2. Mensajes sobre la carga restante de las baterías.

3. Mensaje de alarma: Este mensaje indica que se debe apagar o reiniciar el vehículo y consiste en el encendido y apagado frecuente de pares de LEDs del mismo color.

Anexo 2: Vistas del interior del vehículo



2.A Vista lateral



2.B Vista frontal

Anexo 3: Prueba de funcionamiento con masa fija



Anexo 5: Prueba de funcionamiento del vehículo

