

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE LOS MÓDULOS DE ELECTRÓNICA DE
POTENCIA PARA UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO ANFIBIO**

Tesis para obtener el Título de Ingeniero Electrónico que presenta el
bachiller:

Juan Miguel Amaya Solís

ASESORES: Willy Eduardo Carrera Soria / Juan Jorge Gonzales Tello

Lima, julio de 2018

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño electrónico de los módulos de potencia para el control de un prototipo de vehículo anfibia.

El diseño se divide en etapa de potencia, para el control de giro de los motores; circuito de protección, que monitorea la energía suministrada a cada motor de modo que podamos generar una señal si se presenta un incremento sustancial en la corriente que alimenta a cada motor; circuito de detección de nivel de agua, ya que es un diseño electrónico para un prototipo de vehículo anfibia se consideró implementar una etapa que detecte la transición de tierra a agua; y etapa de control, para comandar a los motores y verificar el correcto funcionamiento de los módulos, así como también para generar las señales necesarias para poder realizar las pruebas y medir los voltajes en las entradas y salidas de cada módulo.

La etapa de potencia fue diseñada utilizando puentes H para controlar el sentido de giro de cada motor. Adicionalmente, cada puente H presenta una salida indicadora de exceso de corriente, para ello se implementó una resistencia de un valor muy pequeño en serie con el motor que a medida que aumente la corriente, el nivel de tensión en la resistencia también aumenta y se puede comparar con una referencia. El circuito de protección toma los valores de las resistencias indicadoras de exceso de corriente en los motores para luego compararlos con un voltaje de referencia que en este caso viene dado por un diodo. Para la comparación se usó una configuración con amplificadores operacionales. A su vez, este módulo cuenta con un circuito detector de batería baja que genera un cambio de nivel lógico si se detecta que el voltaje en la batería disminuyó considerablemente.

El módulo de detección del nivel de agua aprovecha la conductividad del agua para inducir una corriente pequeña, la cual al ser amplificada y debidamente acondicionada a niveles lógicos puede ser usada por un circuito digital.

Finalmente, durante las pruebas finales se utilizó un microcontrolador ATmega 8 para controlar el sentido de giro de los motores mediante los puentes H.

TEMA DE TESIS APROBADO POR EL DECANO

COLOCAR COPIAS DE FORMATO T1



TEMA DE TESIS APROBADO POR EL DECANO

COLOCAR COPIAS DE FORMATO T1



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1 PRINCIPIOS Y ANTECEDENTES DE LOS VEHÍCULOS ANFIBIOS	2
1.1 PRINCIPIOS DE UN VEHÍCULO ANFIBIO	2
1.1.1 PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES	2
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3 NUEVAS TECNOLOGÍAS	5
1.3.1 CARROS ANFIBIOS ACTUALES	5
1.3.2 ROBOTS ANFIBIOS	7
2 PARTES Y TIPOS DE VEHÍCULOS ANFIBIOS	9
2.1 PARTE MECÁNICA	9
2.2 PARTE ELECTROMECAÁNICA	10
2.2.1 SISTEMA DE DIRECCIÓN	10
2.2.2 SISTEMA DE PROPULSIÓN	10
Propulsión con Hélices Marinas	10
Propulsión por chorro de agua	12
2.3 PARTE ELECTRÓNICA	12
2.3.1 ELECTRÓNICA DE POTENCIA	12
2.3.2 ELECTRÓNICA DE CONTROL	13
2.3.3 SENSADO	13
2.3.4 COMUNICACIÓN	13
2.4 TIPOS DE VEHÍCULOS ANFIBIOS	14
2.4.1 VEHÍCULOS ANFIBIOS PARA AGUA	14
2.4.2 VEHÍCULOS ANFIBIOS PARA OTROS FLUIDOS	14
3 DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y SISTEMA DE PROTECCIÓN	15
3.1 ALCANCE	15
3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	15
3.3 PLANTA	16
3.4 POTENCIA	17
3.5 PUENTES H	19
3.5.1 TARJETA DE PROTECCIÓN	29
3.6 SENSOR	33
3.6.1 SENSADO DE BATERÍA BAJA	33

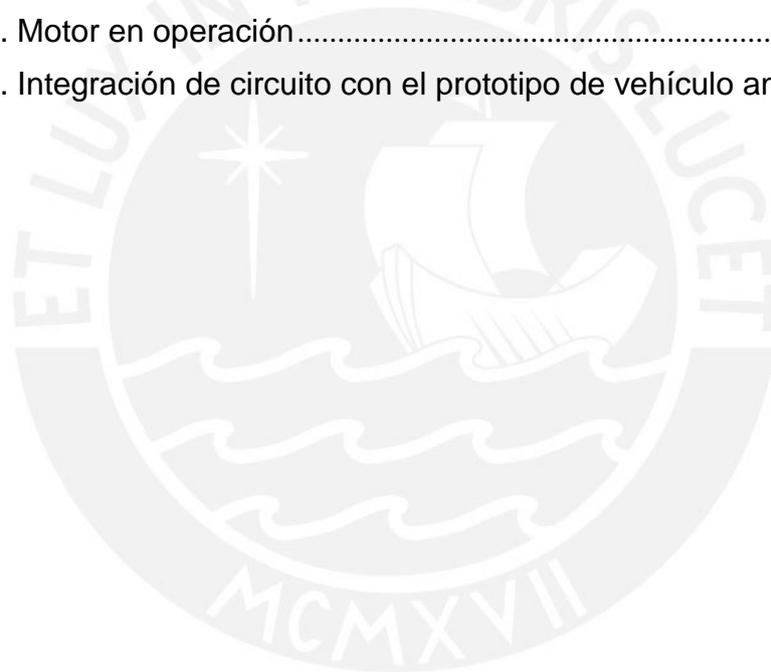
3.6.2 SENSADO DE INMERSIÓN	34
3.7 CONTROL	39
3.8 FUENTES DE ALIMENTACIÓN.....	40
3.9 SOFTWARE.....	43
3.10 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	45
4 DISEÑO FINAL, CARACTERÍSTICAS Y PRUEBAS	46
4.1 INTEGRACIÓN DE LOS MÓDULOS	46
4.2 PRUEBAS.....	47
4.2.1 SENSADO DEL NIVEL DEL AGUA.....	47
4.2.2 TARJETA DE PROTECCIÓN	47
4.2.3 PUENTES H CONTROLADOS POR ATMEGA 8.....	49
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.1. Volumen desplazado en el agua a causa de un cuerpo.....	3
1.2.1. Ford GPA o Seep (Sea Jeep).....	4
1.2.2. DUKW de General Motors.....	5
1.3.1.1. Rinspeed sQuba	5
1.3.1.2. ARGO Frontier 6x6.....	6
1.3.1.3. GIBBS Quadski.....	7
1.3.2.1. RHex.....	7
1.3.2.2. Salamandra robótica.....	8
1.3.2.3. ACM-R5H.....	9
2.2.2.1. Hélice de 4 paletas	11
2.2.2.2. Hélices en el Rinspeed sQuba	11
2.2.2.3. Propulsión por chorro de agua	12
3.2.1. Diagrama de bloques del sistema	15
3.3.1 [Fotografía del Ing. Juan Jorge Gonzáles Tello]. (Lima. 2010). Prototipo Planta	16
3.3.2. Diagrama de fuerzas	16
3.5.1. Circuito esquemático del puente H para un motor	19
3.5.1.1. Configuración típica del LDO LM2941 extraída de la hoja de datos del fabricante.....	30
3.5.1.2. Circuito esquemático de la configuración del LDO	31
3.5.1.3. Circuito esquemático de la configuración del detector de exceso de corriente en el motor	31
3.5.2. Circuito simplificado para un motor.....	20
3.5.3. Circuito del puente H	23
3.5.4: Corriente de Drenador vs. Voltaje Drenador – Surtidor en el MOSFET IRF9540	24
3.5.5: Corriente de Drenador vs Voltaje Drenador - Surtidor en el MOSFET IRF540.....	26
3.5.6. Diagrama de control de circuitos Puente H.	28
3.5.7. Desplazamiento del prototipo.....	29
3.6.1.1. Circuito detector de batería baja	33
3.6.1.2. Batería en nivel aceptable	34
3.6.1.3. Batería en nivel bajo.....	34
3.6.2.1. Circuito detector de agua.....	35
3.6.2.2. Circuito de entrada simplificado	36

3.6.2.3. Corriente de Salida vs. Corriente de Entrada.....	36
3.6.2.4. Circuito de salida simplificado.....	37
3.6.2.5. Corriente de Salida vs. Voltaje V_{CE} en Saturación.....	37
3.6.2.6. Circuito simplificado del detector de agua	39
3.8.1. Características eléctricas KA7805.....	40
3.8.2. Características eléctricas ATmega8	41
3.8.3. Configuración típica KA7805.....	41
3.9.1. Diagrama de flujo del recorrido programado con microcontrolador.....	43
3.9.2. Diagramas de flujo de las subrutinas de control	44
3.9.3. Módulo de control con microcontrolador ATmega8.....	44
4.1.1. Integración de Módulos.....	46
4.2.3.1. Motor inactivo	49
4.2.3.2. Motor en operación.....	50
4.2.3.3. Integración de circuito con el prototipo de vehículo anfibia	51



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de la electrónica es más común en vehículos autómatas, para ello se crean diversos robots que pueden realizar excursiones en medios específicos, siendo el más común el medio terrestre, pero también existe un medio a considerar como los fluidos, siendo esta parte poco estudiada y desarrollada en nuestro entorno donde la electrónica debe ser diseñada especialmente para ciertos fines como la capacidad de controlar la locomoción de un vehículo de tierra a agua y viceversa.

La invención de los vehículos anfibios fue el comienzo del uso de nuevas técnicas para el control de estos vehículos. Distintos tipos de diseños y principios fueron aplicados, inicialmente de uso bélico hasta la actualidad en que la electrónica y la energía renovable son características principales e innovadoras.

El uso de robots con capacidad para desplazarse abarca en su mayoría el medio terrestre, siendo algunos robots dotados con características anfibias pero con la salvedad de que son controlados por un operador, por ello interesa analizar los aportes de la ingeniería y tomar en cuenta sus ventajas y diseñar la electrónica de potencia de un prototipo de carro anfibio capaz de gobernar el movimiento de dos motores para la propulsión y dirección del vehículo que pueda ser utilizado para fines que potencialmente podrían incluir rescate, exploración, monitoreo, etc.

El diseño de los módulos de electrónica de potencia para un prototipo de vehículo anfibio es parte de un proyecto más elaborado. El Carro Anfibio presenta varias etapas, en este trabajo se diseñará la electrónica de potencia y el acondicionamiento de señales a niveles lógicos para que puedan ser tomados por un microcontrolador en un trabajo posterior.

En el primer capítulo de este trabajo se muestran los principios para el desarrollo de un vehículo anfibio como es la ley de hidrostática y el uso de los vehículos anfibios a lo largo de la historia.

El segundo capítulo muestra las tecnologías empleadas en los vehículos y robots anfibios para el control, sensado y comunicación de modo que se pueda tener una visión amplia de lo que se debe diseñar y como adicional algunas características especiales de algunos de los robots anfibios usados en la actualidad como por ejemplo la integración de cámaras para obtener imágenes de muestra.

El tercer capítulo contempla el diseño de los módulos que abarca la electrónica de potencia para el control de motores (propulsión y dirección), sensado del nivel de agua y electrónica de control.

El capítulo cuatro de esta tesis contiene las distintas pruebas realizadas con los módulos, mediciones obtenidas de manera experimental y comparaciones con valores teóricos. Además de mostrar algunas imágenes relacionadas directamente con las entradas y salidas de las diferentes etapas del diseño electrónico.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de la presente tesis es diseñar los módulos de electrónica de potencia de un prototipo de vehículo anfibia capaz de gobernar el movimiento de dos motores para su propulsión y dirección, así como el diseño de un sistema de protección para evitar dañar la circuitería.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se considerará la detección del nivel de línea de flotación, es decir el sensado del agua mediante un diseño electrónico, para salvaguardar el prototipo ante posibles hundimientos en el agua.

Implementación de un sistema digital que permita mostrar las prestaciones del diseño de los módulos de potencia, entre estas características se encuentran el control de motores y el sentido de giro.

1 PRINCIPIOS Y ANTECEDENTES DE LOS VEHÍCULOS ANFIBIOS

Para tener claro el funcionamiento de un vehículo anfibia, se desarrollarán varias etapas para detallar los requerimientos y modo de trabajo de cada una. A continuación se presentarán la teoría y los subsistemas de este proyecto.

1.1 PRINCIPIOS DE UN VEHÍCULO ANFIBIO

1.1.1 PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

El diseño del carro está basado principalmente en la ley de hidrostática de Arquímedes, sus principios serán aplicados para poder desarrollar y estimar las características del carro así como también el peso que podrá soportar en el agua hasta antes de que el carro se hunda.

El sabio griego Arquímedes (287-212 a.C.) fue el primero en medir el empuje que los líquidos ejercen sobre los sólidos sumergidos en ellos, con la consiguiente pérdida aparente de peso, su principio se enuncia:

“Todo cuerpo sólido introducido en un fluido, total o parcialmente, experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado por el cuerpo”.

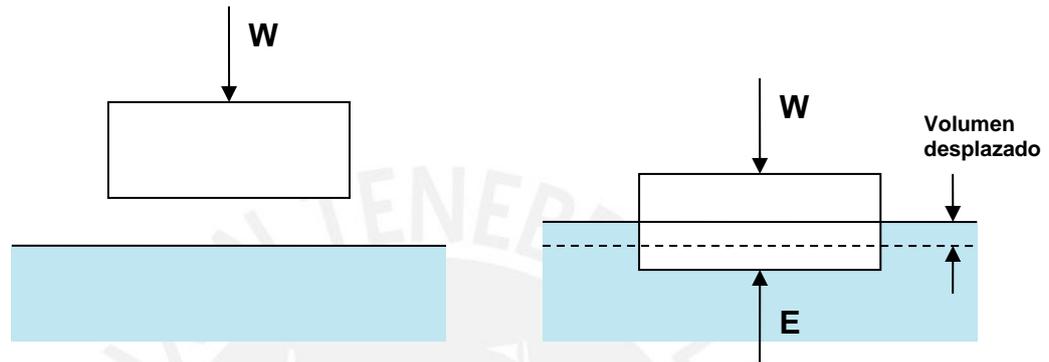


Figura 1.1.1. Volumen desplazado en el agua a causa de un cuerpo.

Se puede observar en la Figura 1.1.1 un sólido que desplaza un volumen y las fuerzas que intervienen al ser sumergido en el agua.

El peso del sólido sumergido es:

$$W = m_s \cdot g = V_s \cdot \rho_s \cdot g \quad (1.1)$$

Teniendo en cuenta la definición de empuje: «peso del fluido desalojado por el sólido sumergido»:

$$E = V_s \cdot \rho_L \cdot g \quad (1.2)$$

V_s : volumen del sólido sumergido (m^3).

ρ_L : densidad del líquido, generalmente agua (kg/m^3).

g : aceleración de la gravedad ($g = 9,8 \text{ N/kg}$).

1.2. ANTECEDENTES

El desarrollo de vehículos anfibios se remota a la segunda guerra mundial. Años anteriores a 1942, las embarcaciones militares tenían que esperar a orillas del mar que se dispongan de facilidades para el desembarque de cargamentos militares en puertos extranjeros, tiempo que podía durar inclusive meses ya que las opciones de desembarque eran escasas. Por tal motivo, el Comité de Investigación de Defensa Nacional de los Estados Unidos (NDRC) tuvo la necesidad de desarrollar un nuevo método de desembarco.

Fue entonces que se delegó a Willys, Ford y Bantam el diseño y fabricación de vehículos anfibios en el año 1941. En primera instancia, se tomó como punto de partida un Jeep de un cuarto de tonelada, el modelo Ford GPA Amphibian o Seep (Sea Jeep, Figura 1.2.1) fue desarrollado para transportar principalmente soldados, pero era un modelo muy pequeño, difícil de maniobrar y con una oleada se volcaba fácilmente por lo que se descartó ya que solo servía en lugares de aguas calmas y no cumplía con su objetivo primordial: transportar cargamento militar.



Figura 1.2.1. Ford GPA o Seep (Sea Jeep). Fuente: <http://www.m201.com/GPA.htm>

Posteriormente se desarrolló un mejor modelo que contaba con los requerimientos para la guerra: el DUKW (ver Figura 1.2.2). El modelo era basado en una camioneta de la General Motors de dos toneladas y media. El DUKW (pronunciado popularmente como DUCK) era más largo que el modelo Seep de Ford, era más pesado pero tenía la característica de poder desplazar cargamento bélico como armas y municiones que eran pesadas, cosa que el Seep no podía debido a su pequeño tamaño, además de ser fácil de maniobrar y podía usarse en el mar sin volcarse lo que lo convirtió en el vehículo ideal para los requerimientos de la guerra.



Figura 1.2.2. DUKW de General Motors. Fuente: <http://www.milweb.net/features/dukw.php>

1.3 NUEVAS TECNOLOGÍAS

1.3.1 CARROS ANFIBIOS ACTUALES

La última década nos ha dejado innumerables avances tecnológicos. Los medios de transporte han sufrido cambios significativos en búsqueda de la comodidad y uno de ellos ha sido agregarle la capacidad anfibia a un automóvil común y corriente. Aquí se verán algunos modelos de carros anfibios usados no para fines militares sino como transporte privado, los cuales son:

Fabricante: Rinspeed

Modelo: sQuba



Figura 1.3.1.1. Rinspeed sQuba

Fuente: http://www.rinspeed.eu/conceptcar_Rinspeed-sQuba_6.html

Su desarrollo duró cerca de 30 años. El sQuba (Figura 1.3.1.1) es un vehículo anfibia y submarino, dispone de motores eléctricos, energía 100% no contaminante, y alcanza unos 120 km/h en la carretera, 5 km/h en la superficie del agua y unos 3 km/h debajo. Para ello dispone de modos de operación distintos para tierra y agua (en agua se impulsa mediante hélices marinas posicionadas en la parte posterior del vehículo), los mismos que deben ser manipulados por el conductor del vehículo.

Fabricante: ARGO

Modelo: Frontier 6x6

Desarrollado por la empresa canadiense ARGO con más de 40 años de experiencia en la producción de vehículos multipropósito, el Frontier 6x6 (Figura 1.3.1.2) tiene una tracción de 6x6 lo que le permite desplazarse en cualquier tipo de terreno no solo en tierra sino también en nieve y arena. En tierra logra una velocidad máxima de 35 km/h y en el agua 5 km/h. Para propulsarse en tierra y agua hace uso de sus llantas que en agua generan una resistencia a través de unos surcos que funcionan como hélices.



Figura 1.3.1.2. ARGO Frontier 6x6. Fuente: <http://www.argoatv.com/products/frontier-6x6>

Fabricante: GIBBS

Modelo: Quadski

GIBBS Sports Amphibians, empresa líder en tecnología de vehículos anfibios de alta velocidad con sede en Auburn Hills, Michigan crearon el Quadski y el Quadski XL (Figura 1.3.1.3). Este vehículo anfibia puede ser tan rápido en tierra como en agua. Con una tecnología que repliega las ruedas con solo un botón y un motor de

1300cc de 4 cilindros puede llegar a ejercer una potencia de 140HP en el agua mediante propulsión a chorro logrando alcanzar una velocidad de hasta 75Km/h.



Figura 1.3.1.3. GIBBS Quadski. Fuente: <http://www.gibbssports.com/quadski>

1.3.2 ROBOTS ANFIBIOS

Robots con capacidad anfibia han sido creados para realizar distintos fines, entre ellos podemos encontrar robots diseñados para rescate, monitoreo, investigación, entre otros. A continuación se mostrarán algunos robots que están siendo usados en la actualidad y que cumplen con estos objetivos:

Fabricante: Boston Dynamics

Modelo: RHex



Figura 1.3.2.1. RHex. Fuente: http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html

El RHex (Figura 1.3.2.1) puede desplazarse tanto en tierra como en agua gracias a sus 6 patas que sirven a su vez como aletas, puede nadar y sumergirse, además cuenta con cámaras para registrar imágenes tanto en frente como detrás del robot, dispone también de un sistema de orientación basado en GPS para una correcta ubicación y es un robot teledirigido. Una versión similar más reciente de este robot llamada Ramius o “El buzo ecológico” está siendo empleada para captar imágenes submarinas y medir la mortandad en los arrecifes de coral y así ver los efectos de la contaminación y calentamiento global.

Fabricante: Ecole Polytechnique Fédéral de Laussane

Modelo: Salamandra robótica

Científicos de la universidad de Burdeos, EPFL y de INSERM desarrollaron un robot que imita la locomoción de una salamandra al que llamaron Salamandra robótica. El robot posee cuatro patas para desplazarse en tierra y en agua imita los movimientos de una serpiente para poder desplazarse (ver Figura 1.3.2.2) y fue creado para investigar la evolución de la locomoción vertebrada. De este modo, pueden entender conceptos biológicos como los estímulos neuronales para generar un movimiento coordinado para la locomoción y cuales pudieron ser los cambios en la médula espinal para evolucionar del movimiento acuático a terrestre.

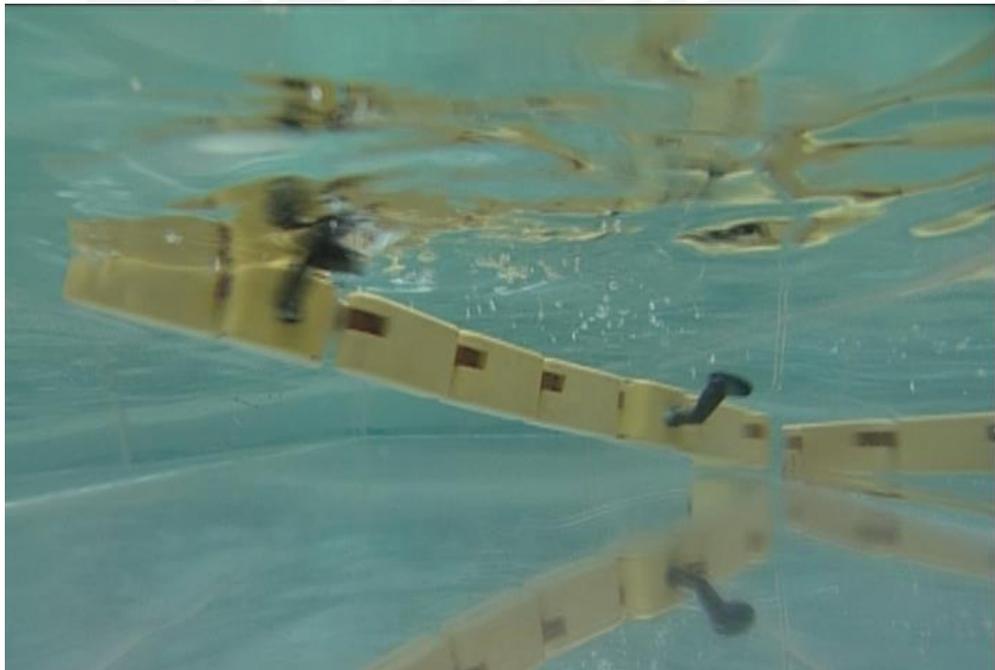


Figura 1.3.2.2. Salamandra robótica. Fuente: <http://biorob.epfl.ch/page-36361.html>

Este robot es controlado de manera inalámbrica mediante una computadora portátil de modo que se pueden controlar las señales en los motores del robot para simular impulsos neuronales.

Fabricante: HiBot

Modelo: ACM-R5H

Este robot anfibio se mueve de manera similar a una serpiente. El modo de movilizarse de las serpientes en tierra y agua es de manera similar, por tal motivo, se dotó al ACM-R5H (Figura 1.3.2.3) de múltiples módulos que al moverse imitan el movimiento serpenteante y que pueden ser aumentados ya que cada módulo que se añada al robot cuenta con su propio CPU y motor independiente de manera que reconoce automáticamente la posición en la que se encuentra para efectuar un movimiento sincronizado. Además cuenta con una cámara en uno de sus extremos para registrar imágenes y fue diseñado con fines de rescate.



Figura 1.3.2.3. ACM-R5H. Fuente: http://www.hibot.co.jp/en/products/robots_1/acm-r5h_33

2 PARTES Y TIPOS DE VEHÍCULOS ANFIBIOS

2.1 PARTE MECÁNICA

El diseño de los módulos de electrónica de potencia tomará como modelo un prototipo de vehículo con un sistema de doble tracción, pero a diferencia de la tracción delantera y posterior, ésta será diestra y siniestra, es decir cada motor controlará las llantas de uno de los lados del carro. Adicionalmente, mediante el control del sentido de giro de los motores, se podrá controlar también la dirección ya que al variar el sentido de giro de uno de ellos se producirá una rotación.

2.2 PARTE ELECTROMECAÁNICA

2.2.1 SISTEMA DE DIRECCIÓN

Los vehículos anfibios actuales poseen un sistema de dirección similar al de un automóvil en tierra, pero en el agua difieren según el tipo de propulsión. Para el caso de propulsión por chorro de agua, se usa una boquilla orientable a la salida del agua. En la mayoría de los sistemas la boquilla orientable puede reflejar el chorro de agua en uno u otro sentido o enviarla para abajo lo que equivaldría a colocar el motor en punto muerto; una instalación más complicada podría enviar el chorro hacia delante y de esa manera conseguir el efecto de frenado o marcha atrás.

Un modo de conseguir la dirección en algunos vehículos anfibios es mediante el uso de hélices marinas. Generalmente se emplean dos hélices de modo que para controlar la dirección se hacen girar las hélices con mayor o menor potencia según sea el caso. El modelo sQuba de Rinspeed por ejemplo, posee además de dos hélices, dos propulsores detrás de las llantas delanteras que se van a encargar de controlar la dirección del vehículo cuando este se encuentre sumergido.

2.2.2 SISTEMA DE PROPULSIÓN

En tierra, los carros anfibios (a excepción del Rinspeed sQuba que posee motores eléctricos) poseen motores de combustión que generan velocidades relativamente altas que suelen ser el promedio de un automóvil común. Sin embargo en la actualidad, debido a los efectos del calentamiento global, se busca emplear nuevas fuentes de energía por lo que se están implementando motores eléctricos. En el agua, los carros anfibios que existen en la actualidad utilizan básicamente dos tipos de tecnologías para su propulsión descritas a continuación:

Propulsión con Hélices Marinas

Las hélices convierten la energía rotacional generada por el motor en el empuje necesario para el desplazamiento de una embarcación. Cuanto más grande sea la hélice más eficientemente trabajará. El problema radica en conseguir un equilibrio entre este tamaño y la capacidad del motor para hacerla rotar a su régimen de trabajo ideal.

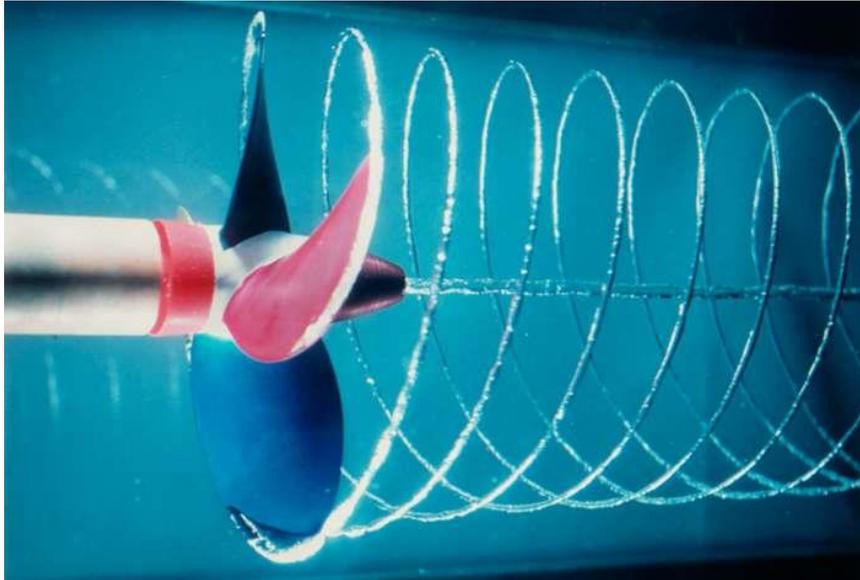


Figura 2.2.2.1. Hélice de 4 paletas. Fuente:
http://www.fondear.org/infonautic/Equipo_y_Usos/Equipamiento/Helices/Helices_marinas.htm

Aunque existen muchos tipos de hélices los 2 más importantes son los que tienen entre 2 y 4 paletas (Figura 2.2.2.1) y son principalmente utilizados por motores intraborda con ejes. Las utilizadas por los motores fueraborda suelen llevar un número de palas que entre 3 y 6. En el caso del modelo sQuba de Rinspeed, para la propulsión en el agua se cuentan con 2 hélices de 3 paletas ubicadas en la parte posterior del vehículo (Figura 2.2.2.2), esto se ve reflejado en la velocidad ya que con este tipo de propulsión el avance es lento.



Figura 2.2.2.2. Hélices en el Rinspeed sQuba.
Fuente: <http://www.desktopmachine.com/framepic.php?id=12449&size=1024>

Propulsión por chorro de agua

En un motor de propulsión a chorro el agua es tomada a través de una abertura en el fondo del casco y forzada a circular hacia un impulsor (una hélice encerrada en un estrecho compartimiento) que la lanza hacia atrás con velocidad para pasar por una boquilla orientable (tobera de dirección) que le asigna dirección de escape (Figura 2.2.2.3).

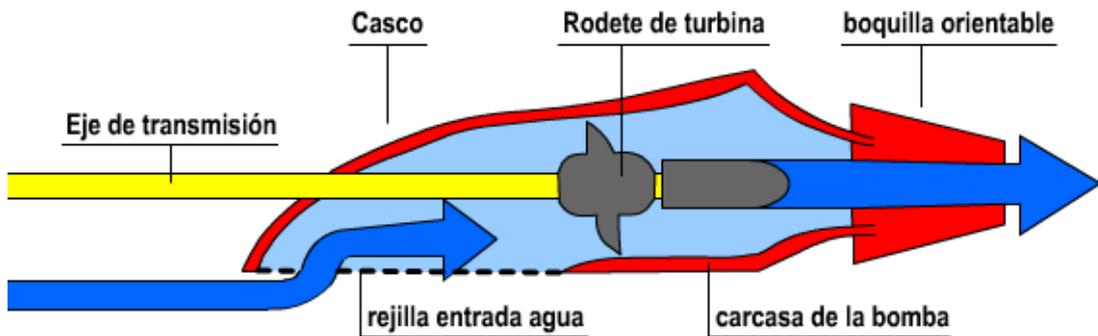


Figura 2.2.2.3. Propulsión por chorro de agua.

Fuente: <http://deportesacuaticos.info/moto-de-agua-motos-acuaticas>

Las ventajas principales que ofrece el sistema son la ausencia de partes rotativas expuestas bajo el casco lo cual hace el sistema muy seguro para aquellos que estén en el agua en proximidades del móvil y otra es la poca profundidad que requiere el sistema para aplicarse con eficiencia

2.3 PARTE ELECTRÓNICA

2.3.1 ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Un carro anfibia dispone de motores para su movilidad. Para el óptimo desarrollo y trabajo del vehículo es necesario un diseño que asegure el correcto funcionamiento de las partes. Esto quiere decir, contar con los sistemas de protección pertinentes contra los factores que puedan afectar el diseño electrónico, los cuales para mencionar algunos pueden ser:

- dv/dt
- di/dt
- Sobrecorriente
- Sobrevoltaje
- Corto circuito
- Radiación

2.3.2 ELECTRÓNICA DE CONTROL

Debido a que generalmente se cuenta con más de una variable, es necesario usar microcontroladores; sin embargo, a pesar que el presente trabajo se centra en los módulos de potencia, se ha visto conveniente el uso de un microcontrolador para probar los circuitos que controlan los motores. El microcontrolador Atmega 8 servirá para controlar estos elementos a fin de mostrar las prestaciones del diseño.

2.3.3 SENSADO

Algunos modelos actuales de vehículos anfibios cuentan con sistemas de sensado que permiten controlar el tipo de propulsión, pero generalmente la conmutación del tipo de propulsión o dirección se hace controlando directamente, es decir el usuario altera estos parámetros. El diseño presentado para un prototipo de vehículo anfibio cuenta con un módulo de sensado de presencia del agua y esta señal es transformada a niveles lógicos de modo que pueda ser leída por un microcontrolador. Para el sensado de esta transición (tierra a agua y viceversa) se ideó usar al agua como conductor, es decir, con dos contactos conductores que estarán separados por una pequeña distancia y ubicados en la parte inferior del carro, de este modo cuando el carro ingrese al agua cortocircuitará estos conductores cerrando el circuito y de este modo generará una pequeña corriente lo que nos dirá que hubo una inmersión.

2.3.4 COMUNICACIÓN

Para el control a distancia de los robots anfibios actualmente usados, en su mayoría utilizan transmisión FM, es decir no son autómatas. En este tipo de comunicación la señal modulada mantiene fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que varía es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a como varíe la amplitud de la señal moduladora.

La frecuencia modulada posee buenas características. La más importante es que al sistema FM apenas le afectan las interferencias y descargas estáticas.

Las características principales de la frecuencia modulada son: su modulación y su propagación por ondas directas como consecuencia de su ubicación en la banda de frecuencia de VHF.

La modulación en frecuencia consiste en variar la frecuencia de la portadora proporcionalmente a la frecuencia de la onda moduladora (información), permaneciendo constante su amplitud. A diferencia de la AM, la modulación en frecuencia crea un conjunto de complejas bandas laterales cuya profundidad (extensión) dependerá de la amplitud de la onda moduladora. Como consecuencia del incremento de las bandas laterales, la anchura del canal de la FM será más grande que el tradicional de la onda media, siendo también mayor la anchura de

banda de sintonización de los aparatos receptores. La principal consecuencia de la modulación en frecuencia es una mayor calidad de reproducción como resultado de su casi inmunidad hacia las interferencias eléctricas.

2.4 TIPOS DE VEHÍCULOS ANFIBIOS

2.4.1 VEHÍCULOS ANFIBIOS PARA AGUA

Existen diversas aplicaciones para los vehículos anfibios en la actualidad. En el ámbito de la exploración submarina, la biónica está siendo una de las principales protagonistas. Charles Gage, un investigador de la Universidad de Bath en Reino Unido, desarrolló un robot inspirado en las características físicas de los cangrejos. Este robot anfibio se desplaza con facilidad en tierra y debajo del agua y sus fines principalmente están orientados a la industria petrolera y de gas, así como también puede ser usado en investigación marina u otros fines que estén ligados al trabajo submarino.

Investigaciones realizadas sobre el comportamiento de las algas marinas y la producción de plancton venenoso ha sido también un motivo para que se desarrollen vehículos anfibios. La mayoría de las especies de algas son muy importantes para la vida en el mar, porque son alimento para especies marinas. Sin embargo, algunos tipos de algas son peligrosos para otras criaturas, sobre todo cuando se reproducen con tanta rapidez que oscurecen el agua del océano con una nube color rojiza llamada marea roja. En el Golfo de México, existen en la actualidad robots anfibios autónomos (o AUV) dedicados a buscar estas algas. Llevan sensores para detectar al alga y para medir el grado de salinidad, a su vez también sensan la temperatura del agua del mar de manera que los científicos puedan estudiar cuándo se forman las mareas rojas.

2.4.2 VEHÍCULOS ANFIBIOS PARA OTROS FLUIDOS

Los avances en la tecnología dieron un gran paso la última década pasada con lo que actualmente se conoce como nanotecnología. En la medicina el campo de operación es bastante amplio. Existen nanorobots que viajan a través de las arterias para eliminar las placas de ateroma que son muy peligrosas puesto que bloquean las arterias con grasa acumulada pudiendo originar un paro cardíaco o derrame cerebral.

3 DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y SISTEMA DE PROTECCIÓN

En el presente trabajo, como se dijo anteriormente, se desarrollará el diseño electrónico de los módulos de electrónica de potencia y adicionalmente el sensado del nivel de línea de flotación. Las señales de salida serán acondicionadas para trabajar con niveles lógicos.

3.1 ALCANCE

El presente trabajo tiene como finalidad realizar el diseño electrónico de un prototipo de vehículo anfibia que dispone de dos motores, este prototipo fue otorgado por el Ing. Juan Jorge Gonzales Tello. Mediante un microcontrolador, el vehículo se desplazará con un recorrido programado y realizará un giro en medio de este recorrido, a su vez sensará el estado de la batería y la inmersión en caso detecte presencia de agua.

3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

El diagrama de bloques del sistema (Figura 3.2.1) muestra cómo los bloques diseñados se interconectan. El diseño dispone de dos motores cada uno gobernado por un puente H con un detector de sobrecorriente, además de sensores de inmersión y batería baja.

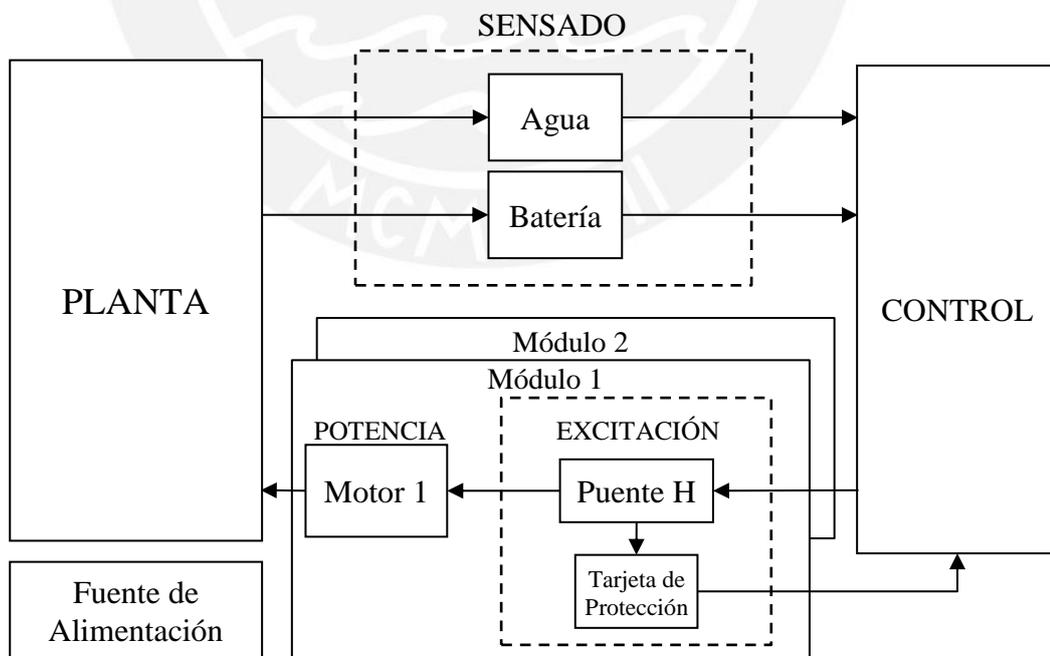


Figura 3.2.1. Diagrama de bloques del sistema

3.3 PLANTA

Se dispone de un prototipo de carro anfibio construido. La Figura 3.3.1 muestra una fotografía de la planta.



Figura 3.3.1 Prototipo Planta.

Fuente: Gonzales Tello, Juan Jorge. Lima, 2010. Cortesía del autor.

Es necesario enfocarse en la masa y partes del carro para hallar el peso total según el diagrama de fuerzas mostrado en la Figura 3.3.2.

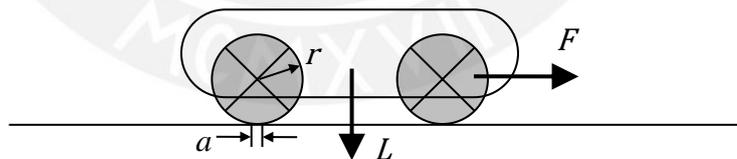


Figura 3.3.2. Diagrama de fuerzas.

Masa del carro: 18 kg

Masa de batería de 12 voltios: 1.5 kg

Masa aprox. de circuito: 0.8kg

Masa total aprox.: $18 + (2 * 1.5) + 0.8 = 21.8$ kg

Peso total aprox.: $L = 21.8 \text{ kg} * 9.8\text{m/s}^2 = 213.64\text{N}$

Por lo tanto necesitamos mover un carro de al menos 21.8 kg o 213.64N.

3.4 POTENCIA

Se dispone de un prototipo con dos motores. La corriente que circula por el motor cuando no tiene carga fue medida experimentalmente mediante la resistencia de 0.1ohmios, por lo que el voltaje en la resistencia de potencia multiplicada por su valor nos daría la corriente circulante. El resultado obtenido fue de aproximadamente 0.033 voltios o 33 milivoltios o que es igual a 0.33 amperios a través del motor:

$$I = 0.033 / 0.1 = 0.33 \text{ A}$$

Debido a que contamos con neumáticos necesitamos hacer un cálculo adicional. Considerando que el carro posee llantas de caucho infladas tomamos el concepto de coeficiente de rozamiento por rodadura μ_r para considerar la fuerza mínima necesaria para mover un objeto.

$$F = \frac{a}{r} L = \mu_r L$$

En tablas de fabricantes de llantas se muestra al coeficiente de rozamiento por rodadura como Crr. La Tabla 1 contiene algunos coeficientes de rodadura de llantas de bicicleta y la Tabla 2 muestra el comportamiento de neumáticos según algunas condiciones.

Tabla 1: Coeficiente de resistencia a la rodadura. Llantas de bicicleta.

C/T	Marca / Modelo	Crr	Watts 30km/h
C	Deda Tre Giro d'Italia	0.0038	26
C	Vittoria Open Corsa Evo CX	0.0039	27
C	Michelin Pro 2 Race	0.0042	29
C	Vittoria Diamante Pro Rain	0.0044	31
C	Michelin Megamium 2	0.0047	33
C	Pariba Revolution	0.0048	33
T	*Veloflex Carbon (Tubular)	0.0049	34
C	Michelin Carbon	0.0050	35
T	*Gommitalia Route du Nord (Tubular)	0.0050	35
C	Panaracer Stradius Pro	0.0051	35
C	Schwalbe Stelvio Plus	0.0052	36
T	*Gommitalia Platinum (Tubular)	0.0053	37

Fuente: <http://www.amtriathlon.com/2009/07/resistencia-la-rodadura-pruebas-de.html>

Tabla 2: Coeficiente de rodadura. Neumáticos en condiciones variables.

C_{rr}	μ_r	Descripción
0,0010 a 0,0024	0.5 mm	Ruedas de ferrocarril de acero sobre rieles de acero
0,0010 a 0,0015	0,1 mm	Rodamientos de bolas en acero sobre acero
0,0025		Neumáticos especiales Michelin para automóvil solar/eco-marathon
0,005		Rieles estándar de tranvía
0,0055		Neumáticos BMX de bicicleta usados para automóviles solares
0,010 a 0,015		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hormigón
0,030 a 0,035		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre alquitrán o asfalto
0,3		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre arena

Fuente: <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisicageneralcn/Resistenciarodadura.pdf>

Tomamos un valor C_{rr} o μ_r alto ya que las llantas no son las mejores del mercado. Con $\mu_r = 0.1$ tenemos que:

$$F = \mu_r L = 0.1 * 225.4N = 22.54N$$

Entonces, por ejemplo si deseamos mover el carro a una velocidad $v = 1\text{m/s}$ entonces la potencia mínima P necesaria para lograr dicho movimiento se calcularía de la siguiente forma:

$$P = F * v = 22.54N * 1\text{m/s} = 22.54 \text{ watts}$$

Se contaba con la parte mecánica construida. El motor con caja reductora y la faja de transmisión lograban una reducción de la velocidad dando como resultado una velocidad angular aproximada de 96RPM o 10.053 rad/s, el radio de los neumáticos era de 93mm, luego obtenemos la velocidad tangencial que sería igual la velocidad a la que se desplaza el carro.

$$V = 10.053 * 0.093 = 0.9349 \text{ m/s}$$

Se dispone de dos motores de 1/4HP cada uno sumando un total de 1/2HP de potencia o lo que es igual a 372.8watts, con dicha potencia y la velocidad calculada podemos obtener el peso máximo que podemos mover con los dos motores:

$$372.8 \text{ watts} = F_{MAX} * 0.9349$$

$$F_{MAX} = 398.76N > 22.54N$$

Por lo tanto, es posible mover el carro con los dos motores de 1/4HP disponibles por lo que se usarán para el diseño de la etapa de potencia.

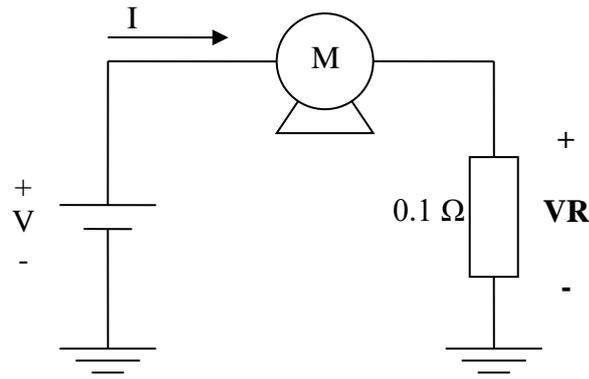


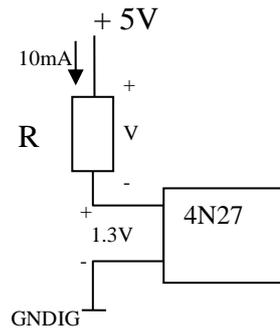
Figura 3.5.2. Circuito simplificado para un motor.

El circuito para el control de uno de los motores debe estar aislado de la etapa digital ya que podría esta última sufrir daños, por tal motivo en la entrada se aprecia un optoacoplador para separar ambos circuitos. Debido a que V_{B0} es un valor digital que será transmitido por el microcontrolador su valor máximo es de 5 voltios. Consideramos tres optoacopladores y comparamos su relación de transferencia CTR (current transfer ratio) según la condición que indica la hoja de datos de cada componente mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3: Relación de transferencia CTR en optoacopladores

Optoacoplador	CTR
PC817 ($I_F=10\text{mA}$)	130%
4N31 ($I_F=10\text{mA}$)	50%
4N27 ($I_F=10\text{mA}$)	30%

Debido a que en el diseño se trabajará con voltajes, no necesitamos mucha relación de transferencia, además que lo ideal sería disipar la menor potencia posible en las resistencias a la salida de los optoacopladores, elegimos entonces el de menor CTR. Para el diseño el integrado 4N27 sería el más adecuado, este optoacoplador presenta como voltaje directo V_F típico 1.3V según su hoja de datos. Para hallar el valor de la resistencia que deberá tener en la entrada tomamos como referencia una corriente de 10mA y hacemos el siguiente cálculo:

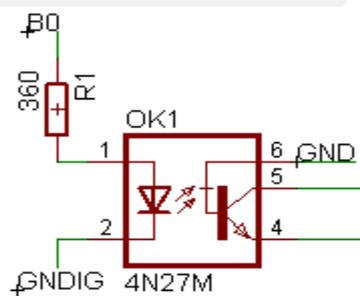


$$R = \frac{(5-1.3)V}{10mA} = \frac{3.7}{10} = 370 \Omega$$

Al calcular vemos que necesitamos una resistencia de 370 ohmios para lograr hacer circular 10mA en la entrada del optoacoplador, el valor comercial más cercano inferior es de 360 ohmios por lo que tomamos este valor para el diseño y asegurar que pasen no menos de 10mA ya que puede haber pérdidas en el circuito.

$$I_F = \frac{(5-1.3)V}{360} = \frac{3.7}{360} = 10.28mA$$

Las conexiones en la etapa de entrada quedarían de la siguiente forma:



La razón de transferencia de corriente CTR para un I_F de 10.28mA es de aproximadamente 30% por lo que calculamos la corriente de salida a considerar:

$$I_C = 0.30 * 10.28 = 3.08mA$$

Para la configuración que tenemos, la corriente que circulará por el colector al saturarse es de 3.08mA.

Se mencionó anteriormente que la corriente que circula por cada motor sin carga medida experimentalmente fue de 0.33A, con carga asumimos que puede llegar a tener un valor de 3 amperios, por lo tanto tomamos como un valor máximo de 6 amperios que deberá circular por cada motor, entonces elegimos unos MOSFETs que cumplan con los requisitos para el diseño. Analizamos dos MOSFETs de canal N, el IRF740 y el IRF540.

IRF740: $I_D = 6.3A$ a $T=100^\circ C$, $V_{DS} = 400V$, $P_D = 125W$

IRF540: $I_D = 15A$ a $T=100^\circ C$, $V_{DS} = 100V$, $P_D = 120W$

Según la hoja de datos de los dispositivos, encontramos que ambos permiten trabajar con 24 voltios, sin embargo la corriente máxima que pueden soportar en el drenador a $100^\circ C$ para el caso del IRF740 es de 6.3A, valor cercano al máximo que estamos considerando, por lo que puede dañarse si se alcanza esta intensidad de corriente, el IRF540 permite trabajar hasta 15A cuando trabaja a altas temperaturas, haciéndolo más adecuado para el diseño.

Elegimos entonces el MOSFET de canal N IRF540. Posteriormente para completar el circuito del puente H elegimos el MOSFET de canal P IRF9540, el complementario del canal N.

Valores máximos según hojas de datos:

IRF9540: $I_D = 12A$ a $T=100^\circ C$, $V_{SD} = 100V$, $P_D = 150W$

Ambos MOSFETs tienen valores máximos que permiten su uso para nuestro diseño por lo que serán usados en el puente H. La figura 3.5.3 muestra la configuración en el circuito.

Es necesario calcular la potencia disipada en cada MOSFET para saber si es necesario el uso de disipadores de calor. Se analiza el caso para cada modelo.

$$\text{IRF540:} \quad P_D = 24V * 3A = 72W < P_{Dmax} = 120W$$

$$\text{IRF9540:} \quad P_D = 24V * 3A = 72W < P_{Dmax} = 150W$$

Halladas las potencias máximas en cada integrado podemos decir que se encuentran dentro del rango de operación sin necesidad de utilizar un disipador.

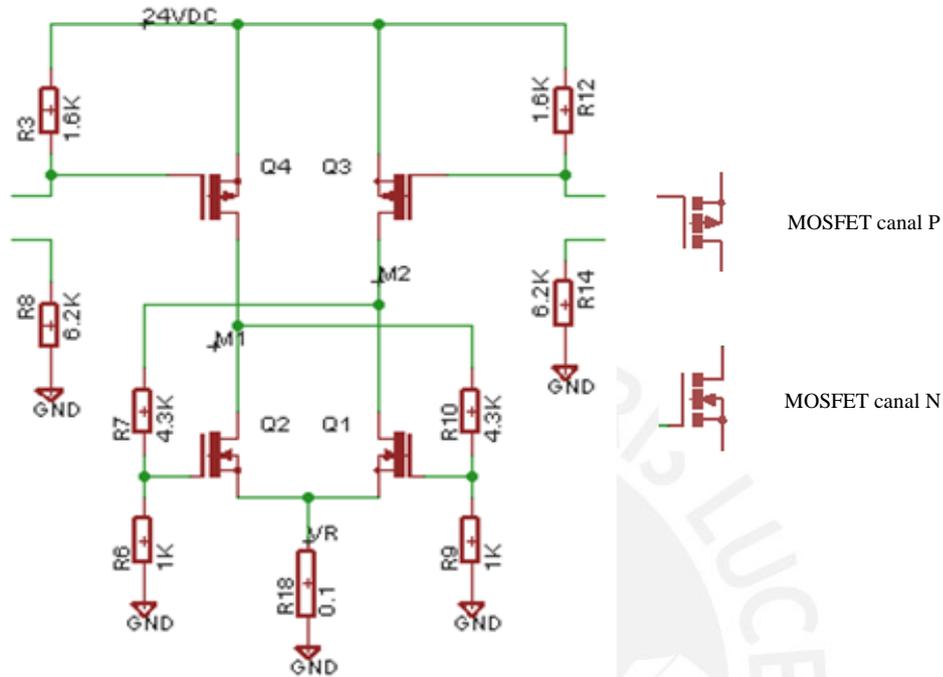


Figura 3.5.3. Circuito del puente H.

Debido a que contamos con un motor de 24 voltios entonces debemos diseñar un puente H con MOSFETs y acondicionar su funcionamiento dependiendo de la fuente de también 24 voltios, la configuración del puente H se aprecia en la Figura 3.5.3; además consideramos que la intensidad de corriente en cada motor podrá tener un valor máximo de 6 amperios. En la etapa superior usamos un MOSFET canal P, fue elegido el IRF9540 que opera con una corriente en el drenador máxima de 12 amperios a 100°C, en la inferior el IRF540 cuya corriente máxima es de 15 amperios a 100°C. Para que el MOSFET tipo P se active revisamos la hoja de datos del dispositivo y encontramos que tiene un voltaje umbral $V_{GS(TH)}$ entre -2 y -4 voltios, entonces para que la corriente circule debemos tener un voltaje menor a -4 voltios entre el surtidor y la puerta. Para el MOSFET tipo N según la hoja de datos el $V_{GS(TH)}$ es de 3 voltios, por lo que necesitaremos un voltaje mayor a 3 voltios para que circule corriente en el drenador.

Tomamos en cuenta los datos del fabricante que nos dice que para el MOSFET Q4 de canal P se requiere un voltaje V_{GS} menor a -4 voltios. La hoja de datos muestra el valor que debe tener el voltaje V_{GS} para que el MOSFET se sature a un determinado valor de corriente en el drenador:

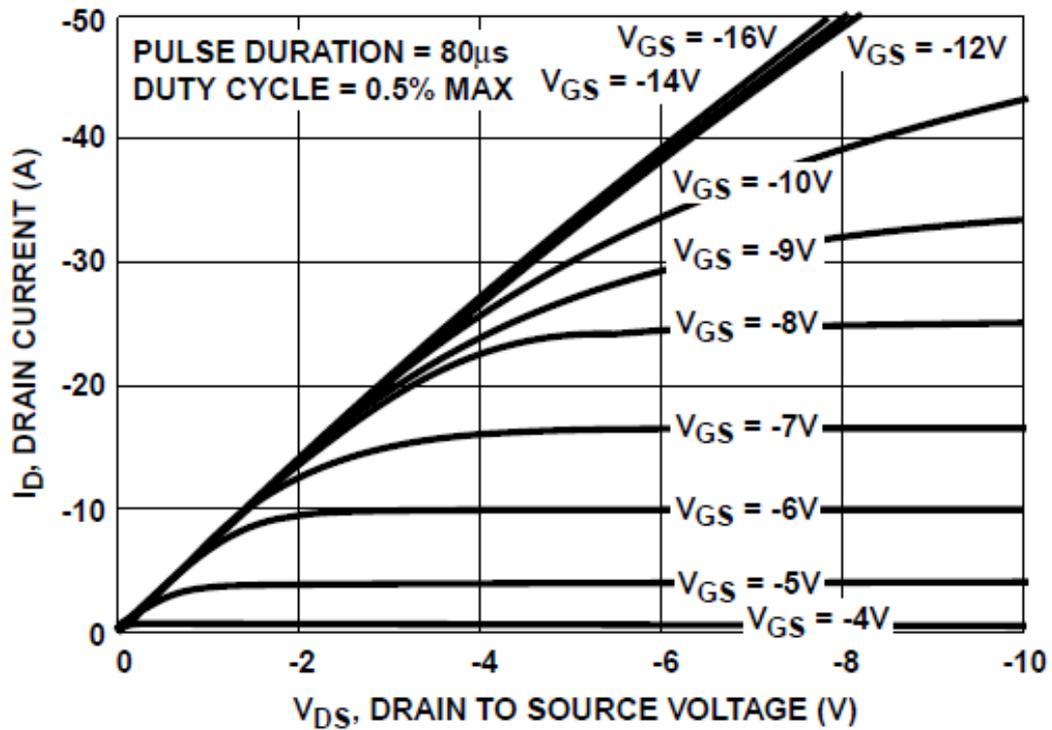
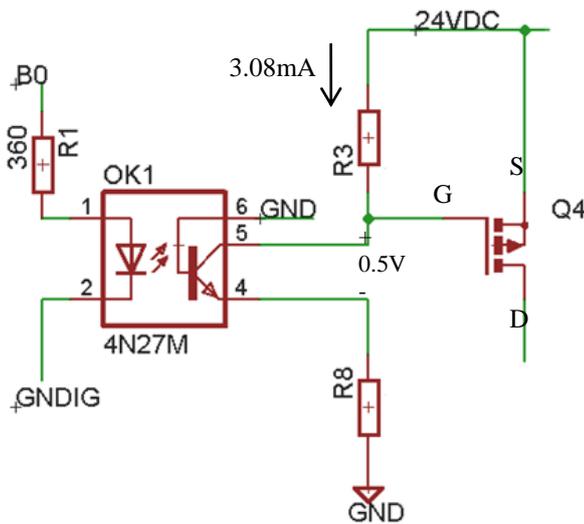


Figura 3.5.4: Corriente de Drenador vs. Voltaje Drenador – Surtidor en el MOSFET IRF9540.

Fuente: Intersil SA.

Vemos en la Figura 3.5.4 que para saturar el MOSFET de canal P a una corriente de 6 amperios se necesita un voltaje V_{GS} entre -5 y -6 voltios, tomamos -5.5 voltios. Además, según la hoja de datos del optoacoplador, el valor V_{CE} del optoacoplador es de 0.5 voltios y la corriente que circulará por el colector calculada anteriormente es de 3.08mA. Analizamos el siguiente circuito para obtener los valores de las resistencias, para ello asumimos como primera condición que el optoacoplador se encuentra conduciendo en la salida:



$$V_{GS} = -5.5V$$

$$V_G - V_S = -5.5$$

$$V_G - 24 = -5.5$$

$$V_G = 18.5V$$

Tenemos las siguientes ecuaciones:

$$18.5V = (24 - 0.5) * \frac{R8}{R8 + R3}$$

$$3.08mA = \frac{24 - 0.5}{R8 + R3}$$

Resolviendo:

$$R3 = 1623.4 \Omega$$

$$R8 = 6006.5 \Omega$$

Tomamos para el diseño valores comerciales cercanos a los obtenidos en los cálculos, los valores que podemos considerar para R3 y R8 son:

$$R3 = 1.6k \text{ ohmios}$$

$$R8 = 6.2k \text{ ohmios}$$

La corriente real será:

$$I = \frac{24 - 0.5}{6200 + 1600} = 3.01mA$$

La potencia disipada en cada resistencia será:

$$P(R3) = 3.01mA^2 * 1.6K\Omega = 0.0145watts$$

$$P(R8) = 3.01mA^2 * 6.2K\Omega = 0.0563watts$$

Concluimos que es posible utilizar resistencias de un cuarto de vatio. El valor de V_G cambiará por lo que calculamos el nuevo valor y así confirmar que tenemos un voltaje V_{GS} que saturará de manera correcta el MOSFET Q4:

$$V_G = (24 - 0.5) * \frac{6.2}{6.2+1.6} = 18.68V$$

Con 18.68 voltios en la puerta se obtiene un $V_{SG} = 5.32$ voltios, valor cercano al indicado en la hoja de datos para saturar al MOSFET a una corriente de drenador de aproximadamente 6 amperios.

Output Characteristics

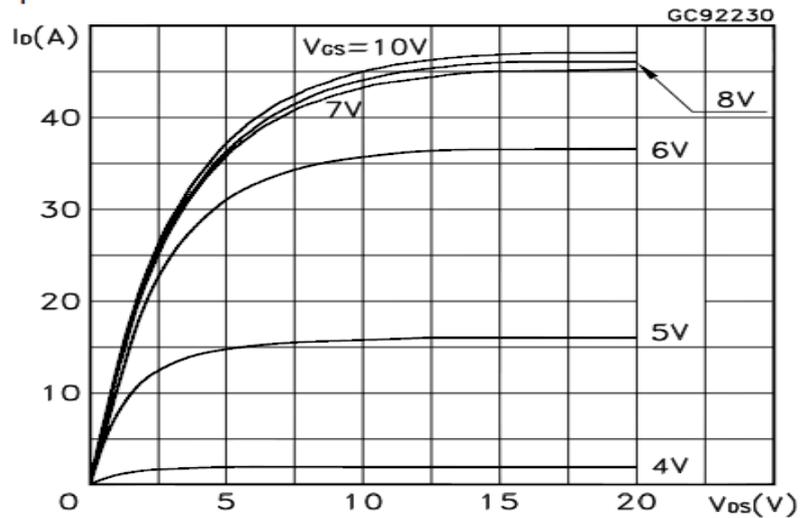


Figura 3.5.5. Corriente de Drenador vs. Voltaje Drenador - Surtidor en el MOSFET IRF540.

Fuente: ST Microelectronics.

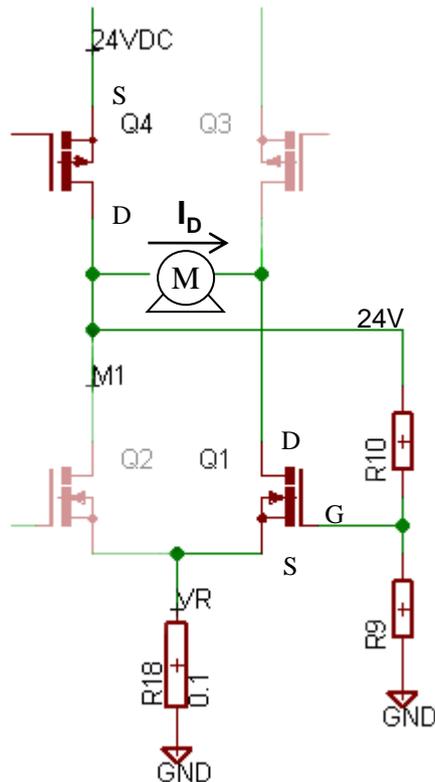
Para la segunda condición en que el optoacoplador no conduce, el voltaje V_{GS} será 0 voltios, por lo tanto el MOSFET no conducirá corriente para energizar el motor.

La siguiente etapa del circuito incluye un MOSFET de canal N, el IRF540. Para calcular el voltaje V_{GS} requerido para saturar el MOSFET a una corriente I_D de 6 amperios nos remitimos a la hoja de datos y analizamos el gráfico mostrado en la Figura 3.5.5.

Del mismo modo en que se analizó para el MOSFET anterior, para el IRF540 podemos ver que para saturar al MOSFET a una I_D de 6 amperios es necesario un voltaje V_{GS} entre 4 y 5 voltios, tomamos un valor de 4.5 voltios para próximos cálculos.

Seguimos analizando el circuito del puente H, cuando el MOSFET Q4 conduce entonces tenemos en M1 24 voltios, este valor se tomará para excitar el MOSFET Q1 de canal N de modo que circule corriente en el motor.

Cuando Q4 conduce el voltaje V_D en ese MOSFET es aproximadamente igual a V_S , esto debido a que el MOSFET cuenta con una resistencia r_{DS} de 0.2 ohmios, es decir consumirá poca tensión, solo habrá que tomar en cuenta que las resistencias R9 y R10 sean mucho mayores para que la resistencia del MOSFET no afecte, para esto podríamos tomar valores mayores a $1K\Omega$.



Hacemos que el MOSFET Q1 conduzca aplicando una tensión en la puerta:

$$V_{GS} = 4.5V = 24 * \frac{R9}{R10+R9}$$

$$R10 = 4.333R9$$

Elegimos valores comerciales:

$$R9 = 1K\Omega$$

$$R10 = 4.3K\Omega$$

El nuevo valor de V_{GS} será:

$$V_{GS} = 4.52V$$

La potencia disipada en cada resistencia será:

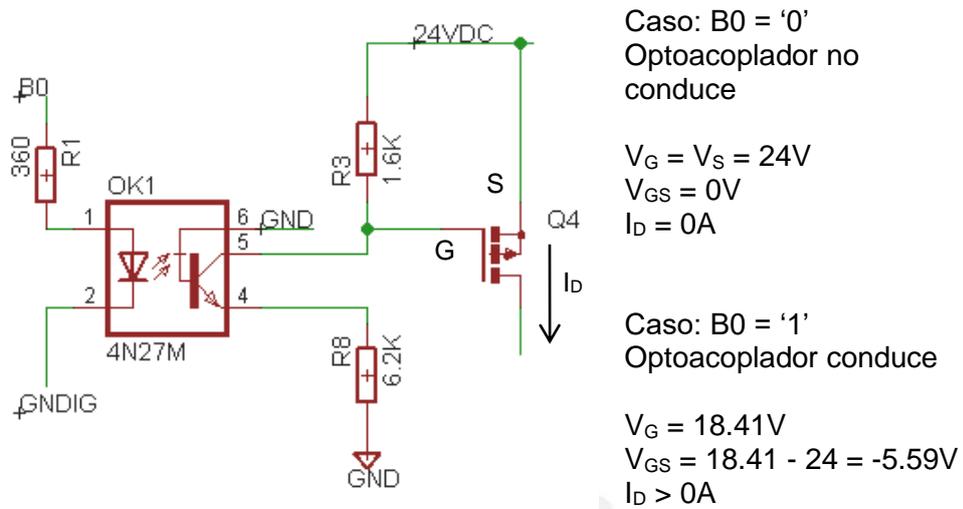
$$P(R9) = (4.52)^2/1K\Omega = 0.02W$$

$$P(R10) = (19.48)^2/4.3K\Omega = 0.088W$$

La resistencia R18 es una resistencia de potencia de 0.1 ohmios y será usada para detectar un nivel alto de corriente, por el momento despreciaremos su efecto en el puente H ($V_R = V_{GND}$), más adelante se detallará su funcionamiento. Consideramos entonces para el MOSFET Q4 $V_D = V_S$ para seguir analizando el circuito y notamos que es posible usar resistencias de un cuarto de vatio.

Si ambos MOSFETs Q1 y Q4 conducen entonces circulará corriente a través del motor y girará en un sentido, para que gire en sentido opuesto se deberá activar la otra línea, es decir los MOSFETs Q2 y Q3. De este modo logramos la configuración del puente H con 4 MOSFETs.

Para activar el motor en un sentido requerimos activar una línea. Como se dijo anteriormente, para que Q4 conduzca se debe superar un voltaje umbral, entonces tomando como entrada una señal enviada desde el microcontrolador, que a su vez pasa por optoacoplador para evitar daños, entonces debemos analizar los dos estados lógicos posibles para controlar una de las líneas y verificar el correcto funcionamiento del diseño.



Los módulos de control de motores fueron diseñados para trabajar con un prototipo de vehículo con dos motores, cada motor controla las llantas de un lado del vehículo.

Para el control de la dirección del prototipo, el sistema controlará el sentido de giro de los motores de modo que si uno de ellos se encuentra girando en sentido opuesto se producirá el giro. En la Figura 3.5.6 se muestra un esquema de las conexiones y en la Figura 3.5.7 los detalles del giro.

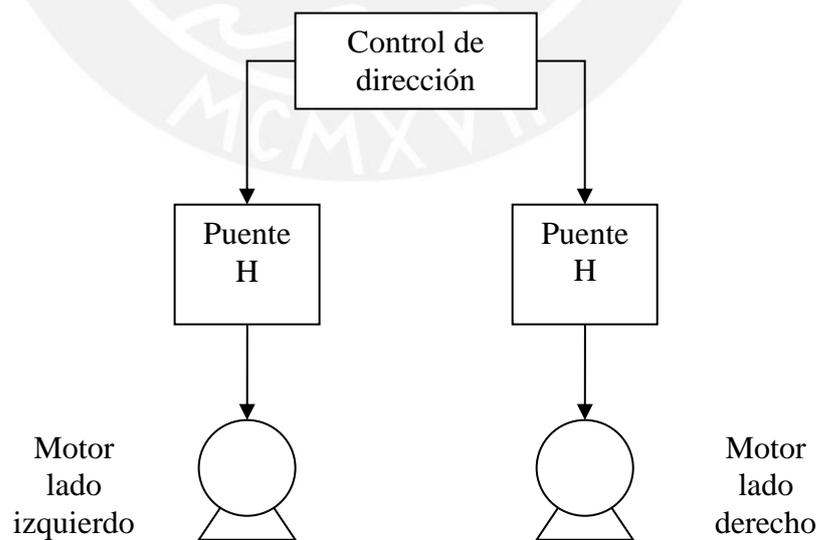


Figura 3.5.6. Diagrama de control de circuitos Puente H.

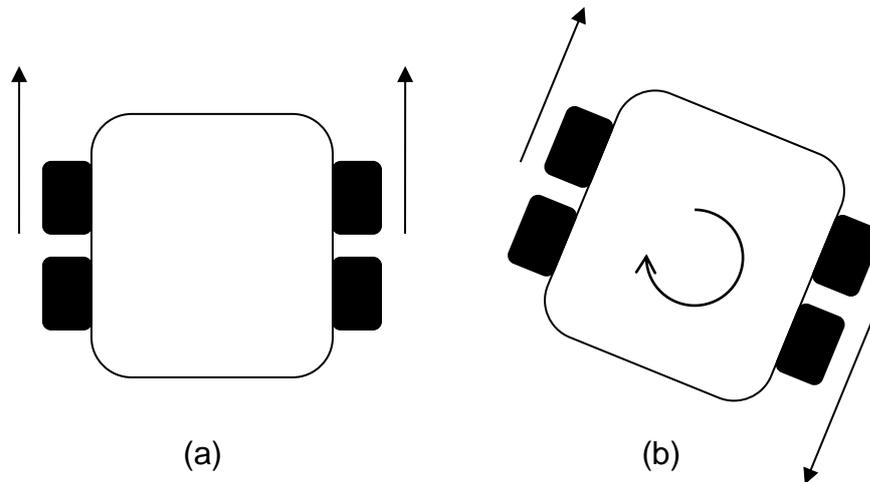


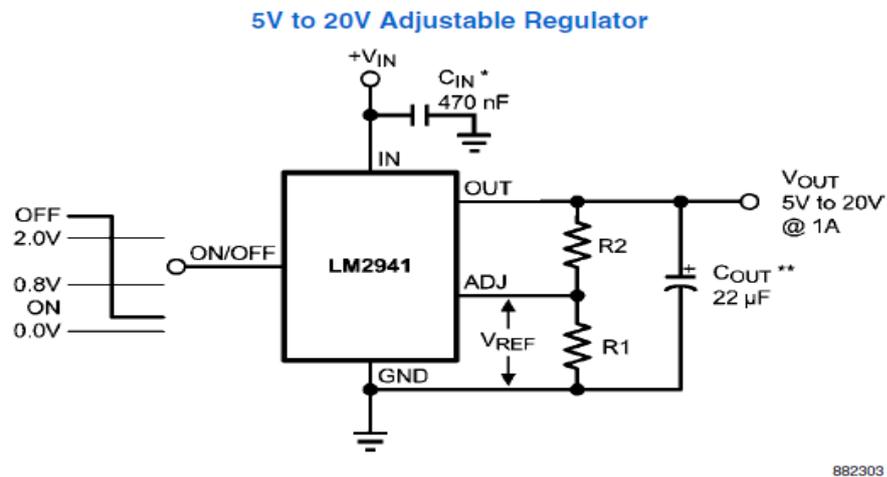
Figura 3.5.7. Desplazamiento del prototipo.

La Figura 3.5.7 (a) muestra el desplazamiento del prototipo de vehículo anfibia cuando los motores giran en el mismo sentido, de modo que la dirección es la misma y el prototipo se desplaza hacia adelante. En la Figura 3.5.7 (b) el motor del lado derecho se encuentra girando en sentido opuesto al motor del lado izquierdo, produciéndose el giro del prototipo con el cambio de dirección hacia la derecha.

3.5.1 TARJETA DE PROTECCIÓN

Para evitar los daños que se pudieran producir debido al exceso de corriente en los motores, se diseñó una tarjeta de protección que tomará como señal de entrada los voltajes de dos resistencias de potencia ubicadas en los puentes H. Este voltaje es proporcional a la corriente por lo que se compara con una señal de referencia, para esto se usará el integrado LM324 que consiste en 4 amplificadores operacionales con la particularidad de trabajar con alimentación asimétrica. Para asegurar el correcto funcionamiento de estos OPAMPs, la tensión de alimentación debe ser un valor fijo, debido a que las baterías pueden descargarse se diseñó una etapa con reguladores de voltaje. Según la hoja de datos del LM324 la tensión de alimentación puede estar entre 3 y 32 voltios. Se necesita un regulador de voltaje positivo y otro negativo. Revisando la hoja de datos de los reguladores de la familia KA78XX y considerando que las baterías pueden llegar a medir menos de 11 voltios, encontramos que el integrado KA7808 podría ser usado ya que el voltaje de entrada puede estar entre 10.5 y 23 voltios, sin embargo una tensión de alimentación de +/- 8 voltios para los OPAMPs no es muy adecuada por lo que es mejor usar un regulador con baja caída de tensión (LDO) que nos permitirá tener al menos una tensión de

alimentación de +/-10 voltios. Revisando hojas de datos se encontró que el regulador LM2941 puede ser usado, ya que cuenta con una caída de tensión máxima de 0.5 voltios y con una tensión de salida regulable desde 5 hasta 20 voltios. También consideramos el regulador LM2991 que es similar al anterior solo que entrega tensión negativa.



$$V_{OUT} = \text{Reference voltage} \times \frac{R1 + R2}{R1} \text{ where } V_{REF} = 1.275 \text{ typical}$$

$$\text{Solving for } R2: R2 = R1 \left(\frac{V_O}{V_{REF}} - 1 \right)$$

Figura 3.5.1.1. Configuración típica del LDO LM2941 extraída de la hoja de datos del fabricante.

En la hoja de datos del LM2941 encontramos la aplicación típica (Figura 3.5.1.1), la misma que usaremos para hallar los valores necesarios en el circuito. Resolvemos la ecuación para obtener un voltaje de salida de 10 voltios:

$$R2 = R1 \left(\frac{10}{1.275} - 1 \right) = R1 * 6.843$$

Asumiendo para R1 un valor comercial no muy grande de 240 ohmios:

$$R2 = 1642.35\Omega$$

El valor comercial más cercano es 1.6kΩ

El circuito esquemático de la etapa reguladora de tensión quedaría configurado como se muestra en la Figura 3.5.1.2.

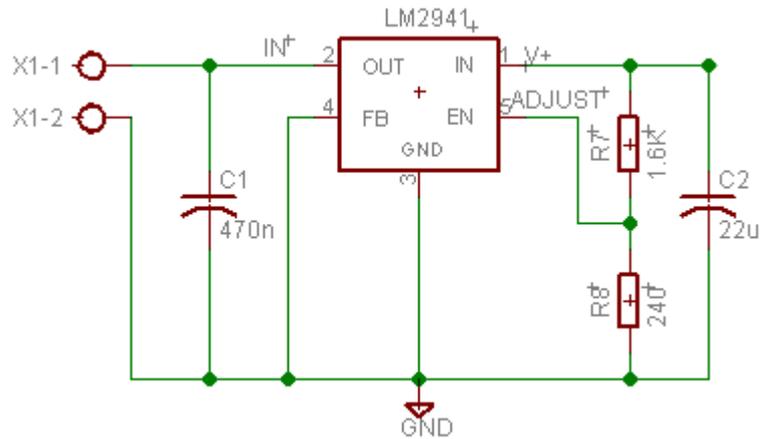


Figura 3.5.1.2. Circuito esquemático de la configuración del LDO

El circuito comparador con un voltaje de entrada equivalente a 10VDC quedaría configurado como se muestra en la Figura 3.5.1.3.

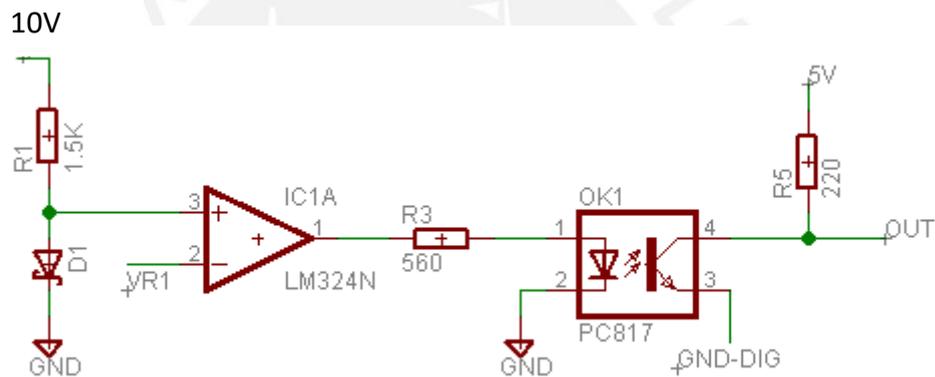


Figura 3.5.1.3. Circuito esquemático de la configuración del detector de exceso de corriente en el motor.

Para realizar la comparación se tomó como referencia la caída de voltaje en un diodo Schottky 1N5711 que según la hoja de datos es aproximadamente 0.6V cuando se hace circular una corriente de 6mA. El voltaje a comparar vendría a ser la caída de tensión en la resistencia de potencia de 0.1Ω del puente H, por lo que la tensión de 0.6V equivaldría a una corriente de aproximadamente 6A. Entonces, si la corriente en cada motor excede ese valor de amperaje se producirá una comparación exitosa y la tensión de salida del OPAMP sería la tensión máxima, en este caso 10V que es la tensión de alimentación; sin embargo esta señal no es digital, por lo que mediante un optoacoplador se genera el acondicionamiento de la señal y a su vez sirve como aislador de la etapa de potencia con la etapa digital. Para hallar el valor de la resistencia R3 se realizó el siguiente cálculo:

$$R3 = \frac{(10-1.2)V}{15mA} = \frac{8.8}{15} = 586.66 \Omega$$

Elegimos una resistencia de 560 ohmios ya que es un valor comercial.

$$I_F = \frac{(10-1.2)V}{560} = 15.71mA$$

La razón de transferencia de corriente CTR del PC817 para un I_F de 15.71mA es de aproximadamente 135% por lo que calculamos la corriente de salida a considerar:

$$I_C = 1.35 * 15.71 = 21.21mA$$

Para entender el comportamiento del circuito se deben analizar dos casos: Cuando el voltaje en la resistencia de potencia es menor a 0.6 voltios (Figura 3.5.1.4) y cuando supera los 0.6 voltios (Figura 3.5.1.5).

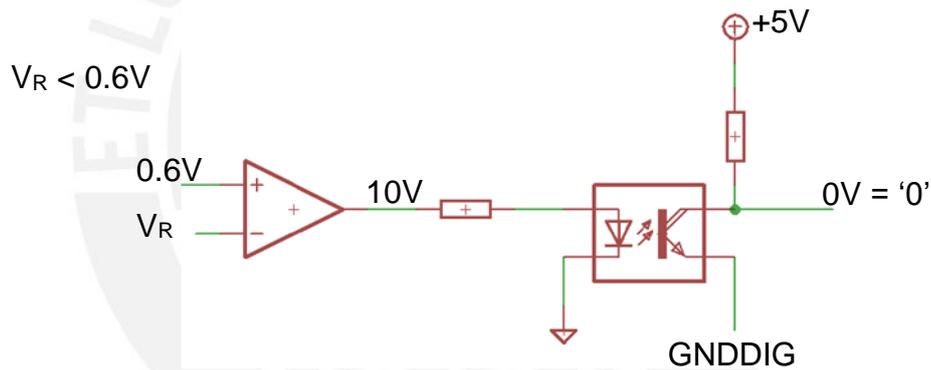


Figura 3.5.1.4. Voltaje en resistencia de potencia que no registra corriente elevada.

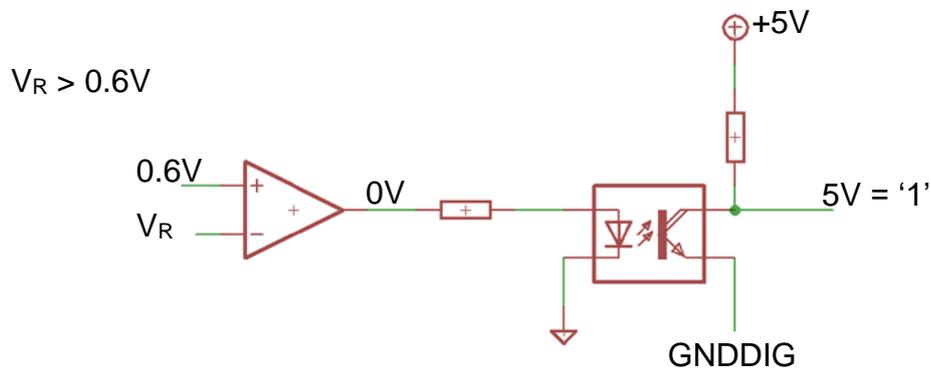


Figura 3.5.1.5. Voltaje en resistencia de potencia que indica corriente elevada.

3.6 SENSOR

En el desarrollo del diseño electrónico se contempló 2 tipos de sensores. El primer sensor es parte de la tarjeta de protección cuya función es detectar la batería baja. Para el segundo sensor, ya que el trabajo está orientado a un prototipo de vehículo anfíbio, se vio conveniente la implementación de un tipo de detector de inmersión. Para ello se diseñó un módulo independiente que detecta la presencia del agua que se detallará más adelante.

3.6.1 SENSADO DE BATERÍA BAJA

Para el primer sensor se implementó un detector basado en un comparador con un voltaje de referencia de 5 voltios. Tomando como valor a sensor el voltaje en una de las baterías, consideramos 10.5 voltios como un valor de batería baja por lo que usaremos divisores de voltaje para su detección. A continuación en la Figura 3.6.1.1 se muestra el circuito esquemático del detector:

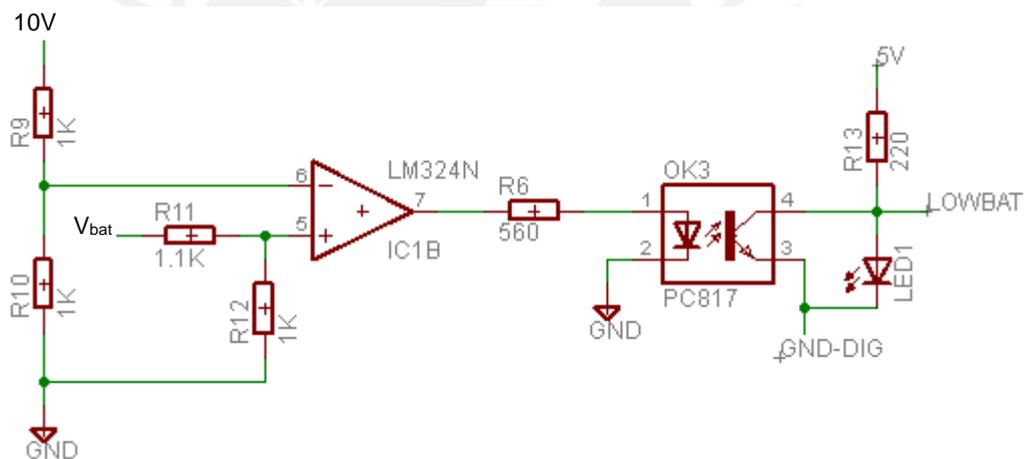


Figura 3.6.1.1. Circuito detector de batería baja.

Para conseguir los voltajes a comparar usamos divisores de voltaje implementados con resistencias del orden de los kilohmios para que circule poca corriente. El valor de referencia como se dijo anteriormente es de 5 voltios, el valor a comparar se toma de un divisor de voltaje de la batería, en este caso considerando 10.5 voltios tendríamos la siguiente ecuación:

$$5 = 10.5 \left(\frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \right)$$
$$10R_{11} = 11R_{12}$$

Elegimos valores comerciales:

$$R11 = 1.1K\Omega$$

$$R12 = 1K\Omega$$

Analizamos cuando la batería está totalmente cargada (Figura 3.6.1.2) y cuando se ha descargado o conseguido un valor de 10.5 voltios (Figura 3.6.1.3).

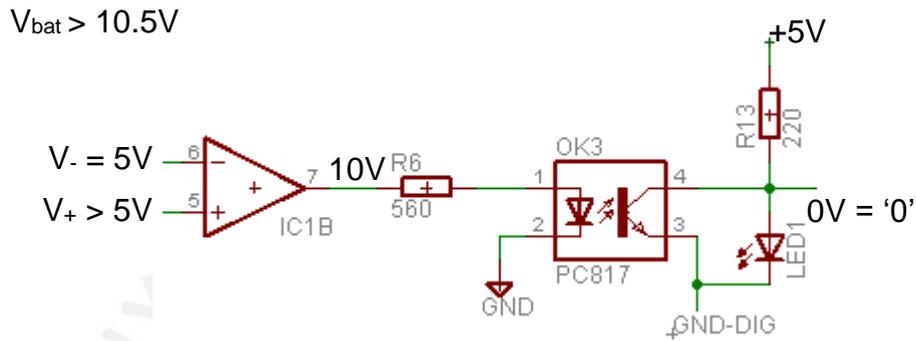


Figura 3.6.1.2. Batería en nivel aceptable.

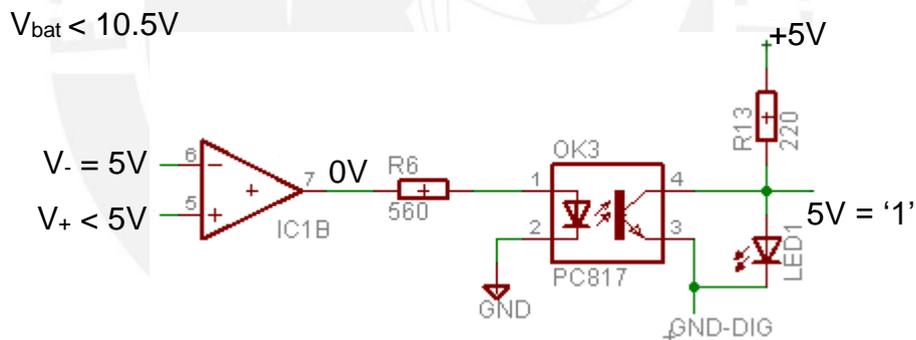


Figura 3.6.1.3. Batería en nivel bajo.

3.6.2 SENSADO DE INMERSIÓN

El sensado de la presencia de agua se implementó mediante el uso del circuito integrado ULN2804 el cual contiene un arreglo de transistores en configuración Darlington. El circuito esquemático del módulo detector de agua se presenta en la Figura 3.6.2.1.

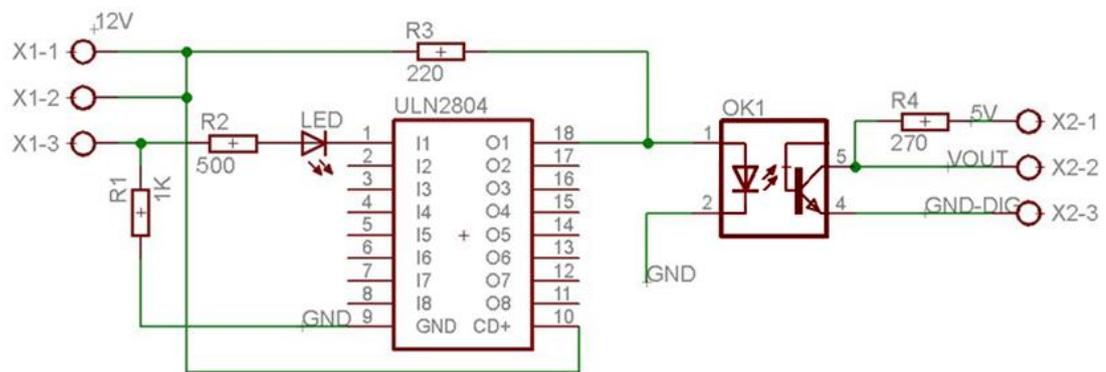


Figura 3.6.2.1. Circuito detector de agua.

Las señales X1-2 y X1-3 son los electrodos que detectarán la presencia del agua. Estos electrodos simulan un interruptor que al entrar en contacto con el agua cierra el circuito. La resistencia R1 de $1K\Omega$ está presente para anular el ruido en el circuito. La resistencia producida por el agua es determinada por la conductancia por lo que tenemos que tomar en cuenta conceptos de química analítica.

$$G = K * A/L$$

Donde:

$G = \text{Conductancia}$

$K = \text{Conductividad}$

$A = \text{Área superficial del electrodo}$

$L = \text{Distancia entre electrodos}$

Consideramos los siguientes valores:

$$K \text{ agua potable} = [0.005, 0.05] S/m$$

$$A = 1 \text{ cm}^2$$

$$L = 0.5 \text{ cm}$$

Elegimos un valor medio para la Conductividad igual a $0.025 S/m$.

$$G = 0.025 \frac{S}{m} * \frac{1 \text{ cm}^2}{0.5 \text{ cm}} = 0.0005 S$$

$$R = \frac{1}{G} = 2000 \Omega$$

El agua entre los electrodos es equivalente a una resistencia de $2K\Omega$, se muestra el circuito de entrada simplificado en la Figura 3.6.2.2.

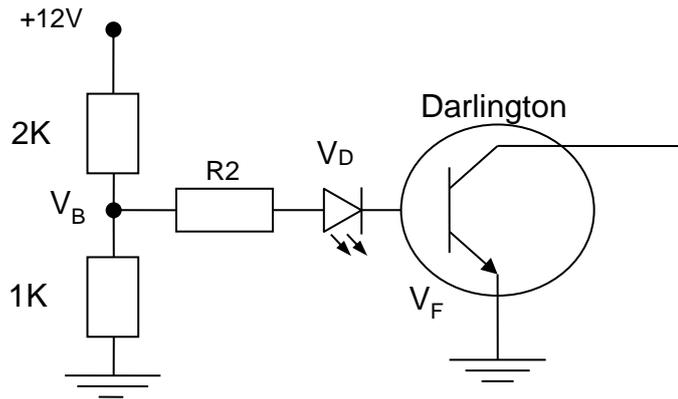


Figura 3.6.2.2. Circuito de entrada simplificado.

Tenemos en el circuito de entrada simplificado un divisor de voltaje entre las resistencias de $1K\Omega$ y $2K\Omega$ lo que nos da V_B igual a 4V, el valor V_F es tomado de la hoja de datos del integrado y es igual a 1.5V mientras que el diodo led para este caso es un diodo de color verde por lo que V_D tiene un valor típico de 2.4V.

Figure 9. Output Current versus Input Current

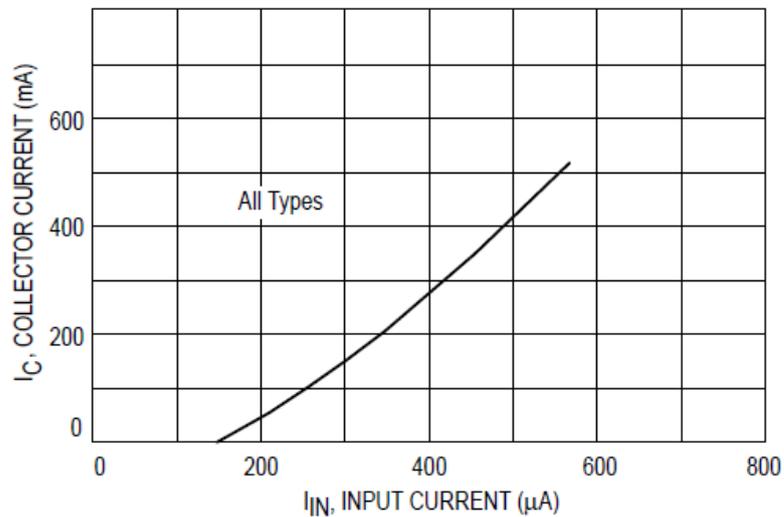


Figura 3.6.2.3. Corriente de Salida vs. Corriente de Entrada.

Con la curva de la Figura 3.6.2.3 tomada de la hoja de datos elegimos una corriente de entrada I_{IN} de $200\mu A$ lo que corresponde a una corriente de salida I_C de aproximadamente 50mA, entonces hallamos el valor de $R2$.

$$4 = 200\mu * R2 + 2.4 + 1.5$$

$$R2 = 500\Omega$$

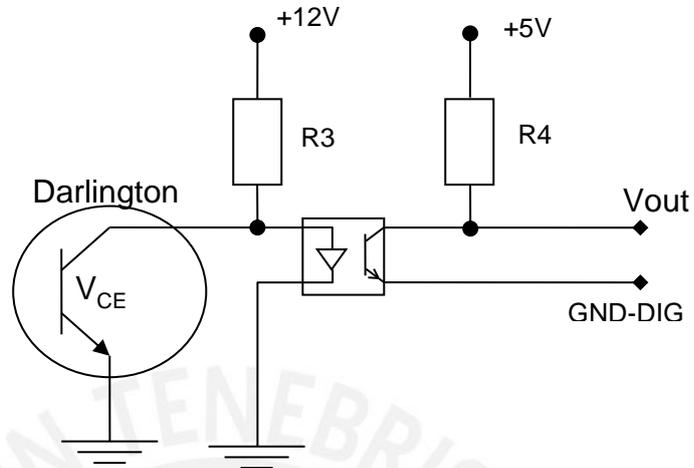


Figura 3.6.2.4. Circuito de salida simplificado.

La salida del integrado se debe acoplar a la etapa digital, el circuito de salida del amplificador Darlington simplificado se muestra en la Figura 3.6.2.4. Se desea calcular el valor de la resistencia R3, para ello usamos como dato I_C de 50mA y el voltaje de alimentación de 12VDC

$$12 = 0.05 * R2$$

$$R3 = 240\Omega$$

Figure 8. Output Current versus Saturation Voltage

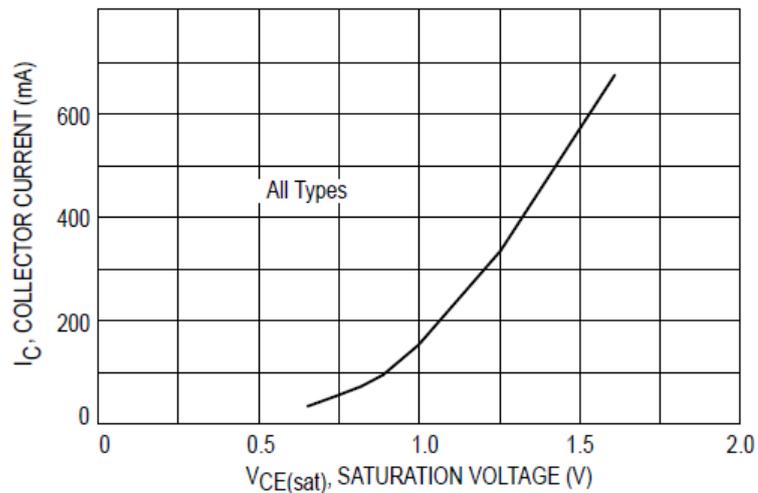


Figura 3.6.2.5. Corriente de Salida vs. Voltaje V_{CE} en Saturación.

Usamos el valor comercial de resistencia de 220Ω , luego hallamos el valor del voltaje V_{CE} cuando el circuito conduce, este valor debe ser menor al voltaje de activación del optoacoplador. Según la hoja de datos, mediante la Figura 3.6.2.5 podemos afirmar que para una corriente I_C de $50mA$ el valor de V_{CE} es aproximadamente $0.7VDC$

Elegimos el optoacoplador tomando en cuenta 3 características, la primera que el voltaje de activación sea mayor a $0.7VDC$, la segunda que la corriente máxima de entrada permisible sea superior a $50mA$ y en tercer lugar que el CTR sea como máximo 50% ya que la salida será acoplada a un microcontrolador y $50mA$ es un valor elevado por lo que se considera un máximo de $25mA$ como corriente de salida del optoacoplador. Según las hojas de datos de los optoacopladores investigados se obtienen los valores mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Datos eléctricos de optoacopladores.

Optoacoplador	$V_F@I_F=50mA$	I_{F-MAX}	CTR@($I_F=50mA$)
PC817	1.2V	50mA	105%
4N31	1.2V	80mA	35%
4N27	1.3V	60mA	110%

Con los datos mostrados en la Tabla 4 observamos que los 3 modelos de optoacopladores cumplen con el primer requisito, en el caso del segundo requisito, los integrados PC817 y 4N27 están cerca del valor I_F por lo que no es recomendable usarlos. Finalmente solo uno de los modelos cumple con el tercer requisito de tener un CTR menor a 50% por lo que elegimos el optoacoplador 4N31 ya que es el único que cuenta con las 3 características deseadas. Calculamos ahora el valor de R_4 según el CTR.

$$I_c = 35\%(50mA)$$

$$I_c = 17.5mA$$

$$5 = 0.0175 * R_4$$

$$R_4 = 285.7\Omega$$

Elegimos un valor comercial de resistencia de 270Ω

La Figura 3.6.2.6 muestra el circuito esquemático simplificado del detector de agua. Inicialmente, cuando los contactos A y B están fuera del agua, no existe corriente a través de la resistencia de 500 ohmios, por lo que el transistor en la salida del circuito integrado se comporta como un circuito abierto, de modo que el optoacoplador conduce y se obtiene GND-DIG en la salida Vout o en otras palabras una tensión de cero voltios.

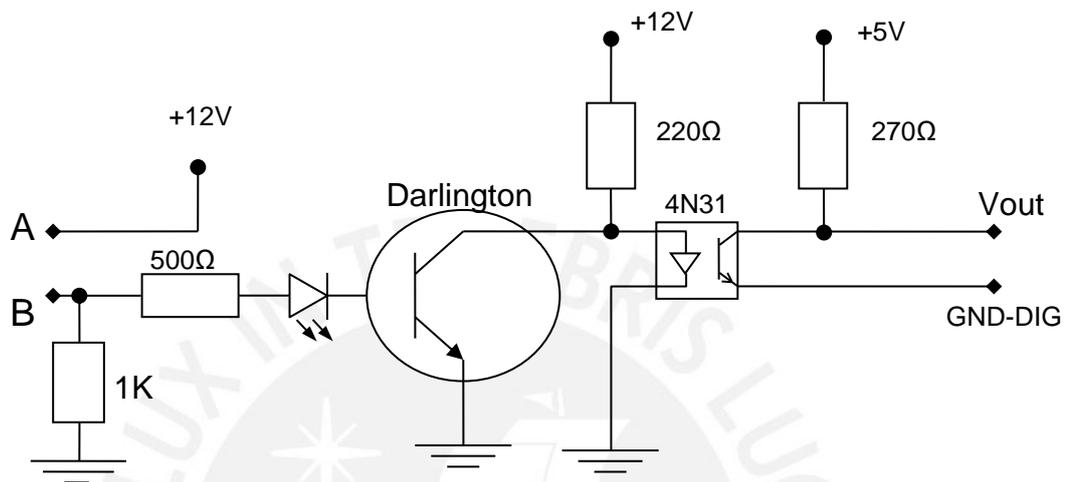


Figura 3.6.2.6. Circuito simplificado del detector de agua.

En caso el sensor detecte la presencia del agua, el circuito se cierra y circula una corriente pequeña a través de la resistencia de 500 ohmios, luego es amplificada y el transistor ubicado a la salida del circuito integrado conduce generando cero voltios en la entrada del optoacoplador por lo que no conduce y se obtiene una tensión de cinco voltios en la salida Vout, valor de voltaje que puede ser interpretada como un '1' lógico.

3.7 CONTROL

El diseño de los módulos de potencia cuenta con dos puentes H que controlan dos motores respectivamente. Para controlar el sentido de giro los puentes cuentan con dos entradas que bien pueden ser señales digitales, por lo tanto se vio conveniente la implementación de un programa en un microcontrolador que genere estas señales de control. Se necesita elegir un microcontrolador que tenga cuatro señales de salida, dos para cada motor y así controlar el giro, consideraremos la disponibilidad y el costo en la elección.

Tabla 5: Aspectos considerables en la elección del microcontrolador.

	PIC 16F887	ATMEGA8	ARDUINO UNO
I/O Pines	35	23	14
Disponibilidad	Alta	Alta	Alta
Costo S/.	15	18	22

Vemos en la Tabla 5 que las tres opciones investigadas cumplen con los requisitos necesarios para la tarea, se elige entonces el microcontrolador ATMEGA8 ya que se está familiarizado con este dispositivo.

3.8 FUENTES DE ALIMENTACIÓN

El diseño requiere una alimentación de 24VDC para energizar los motores, se considerará entonces dos baterías de 12 voltios conectadas en serie para proporcionar la tensión necesaria. Para la energización de los OPAMPs se utilizará la fuente regulada con LDO conocida anteriormente y se conectará a una de las baterías de 12VDC de modo que se pueda obtener una fuente de alimentación de 10VDC estable.

Se analiza el caso de la etapa digital, la misma que necesita un voltaje de alimentación de 5VDC, para esto consideramos el integrado KA7805 cuyos datos según su hoja de datos se pueden apreciar en la Figura 3.8.1.

Electrical Characteristics (KA7805/KA7805R)

(Refer to test circuit, $0^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{mA}$, $V_I = 10\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	KA7805			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.8	5.0	5.2	V
		$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.0\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 7\text{V to } 20\text{V}$	4.75	5.0	5.25	

Figura 3.8.1. Características eléctricas KA7805. Fuente: Fairchild Semiconductor.

Vemos en la hoja de datos del integrado KA7805 que opera con una corriente de salida de 500mA, además encontramos en la hoja de datos del ATmega8 que el consumo máximo de corriente es de 300mA (Figura 3.8.2) y además que la corriente máxima permitida en los pines de entrada es de 40mA, entonces corroboramos que la elección del optoacoplador es correcta ya que este entrega una corriente de 17.5mA, valor permitido muy por debajo del máximo soportado por el ATmega8.

Absolute Maximum Ratings*

Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Voltage on any Pin except $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground	-0.5V to $V_{CC}+0.5V$
Voltage on $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground.....	-0.5V to +13.0V
Maximum Operating Voltage	6.0V
DC Current per I/O Pin	40.0mA
DC Current V_{CC} and GND Pins	300.0mA

Figura 3.8.2. Características eléctricas ATmega8. Fuente: Atmel.

Debido a que contamos con la tensión de entrada de 10VDC podemos utilizar la configuración típica (Figura 3.8.3) y obtener una salida de 5VDC para alimentar el microcontrolador cuyo consumo de corriente máximo es de 300mA, dentro del rango de operación del integrado KA7805.

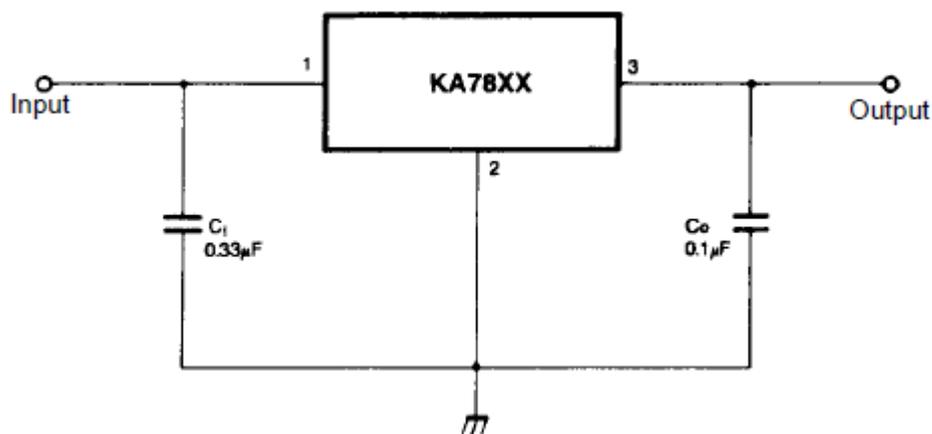


Figura 3.8.3. Configuración típica KA7805. Fuente: Fairchild Semiconductor.

Existen distintos tipos de baterías en el mercado, las más conocidas son las de plomo ácido, las de níquel y las de iones de litio. Las de plomo ácido son las más usadas por su gran cantidad de aplicaciones, además de no ser muy costosas, se usan mayormente en industria automotriz. Las baterías de níquel si bien no son muy caras presentan el llamado “efecto memoria” que obliga a descargar totalmente la batería

antes de ser recargada ya que si no se acorta la vida de la misma. Las baterías de iones de litio son muy costosas por lo que no es conveniente considerarlas.

Por los motivos anteriormente expuestos, las baterías de plomo ácido son las más adecuadas para el circuito. Consideraremos también una autonomía de 1 hora para calcular la capacidad eléctrica de las baterías:

ATmega8: $I = 10.28\text{mA} @ 5\text{VDC}$ en cada pin (se usan 2 pines en simultáneo)

Capacidad Ah = $2 * 0.01028\text{A} * (1\text{h}) = 0.02056\text{Ah}$

Energía consumida Wh = $0.02056\text{A} * 5\text{V} = \mathbf{0.1028\text{Wh}}$

LM324: $I = 15.71\text{mA}$ (valor que triplicaremos ya que son 3 comparadores)

Energía consumida Wh = $3 * 0.01571\text{A} * 10\text{V} * (1\text{h}) = \mathbf{0.4713\text{Wh}}$

ULN2804: $I = 200\mu\text{A}$

Resistencia $1\text{k}\Omega$: Wh = $1000\Omega * (0.004\text{A})^2 * (1\text{h}) = 0.016\text{Wh}$

Energía consumida Wh = $[10^{-6} * 200\text{A} * 12\text{V} * (1\text{h})] + 0.016 = \mathbf{0.0184\text{Wh}}$

2 motores trabajando a 3 A: $6\text{A} @ 24\text{VDC}$

Capacidad Ah = $6\text{A} * (1\text{h}) = 6\text{Ah}$

Energía consumida Wh = $24 * 6 = \mathbf{144\text{Wh}}$

Energía total consumida:

Wh = $0.1028 + 0.4713 + 0.0184 + 144 = \mathbf{144.5925\text{Wh}}$

Capacidad Ah total: $144.6 / 24 = 6.025\text{Ah}$

Podríamos elegir baterías de 12 VDC de 7 Ah o mayores, para no forzar las baterías a trabajar a su capacidad máxima elegimos un tipo de baterías con una capacidad mayor.

Por lo tanto se elige usar 2 baterías de 12 voltios de 12 Ah, de este modo trabajarán al 50% de su capacidad.

3.9 SOFTWARE

Para el control de los motores, así como el sentido de giro, se programó un recorrido que hace girar a los motores y luego de cierto tiempo invierte el sentido de giro en uno de ellos, para luego de unos segundos volver al sentido de giro inicial. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Figura 3.9.1.

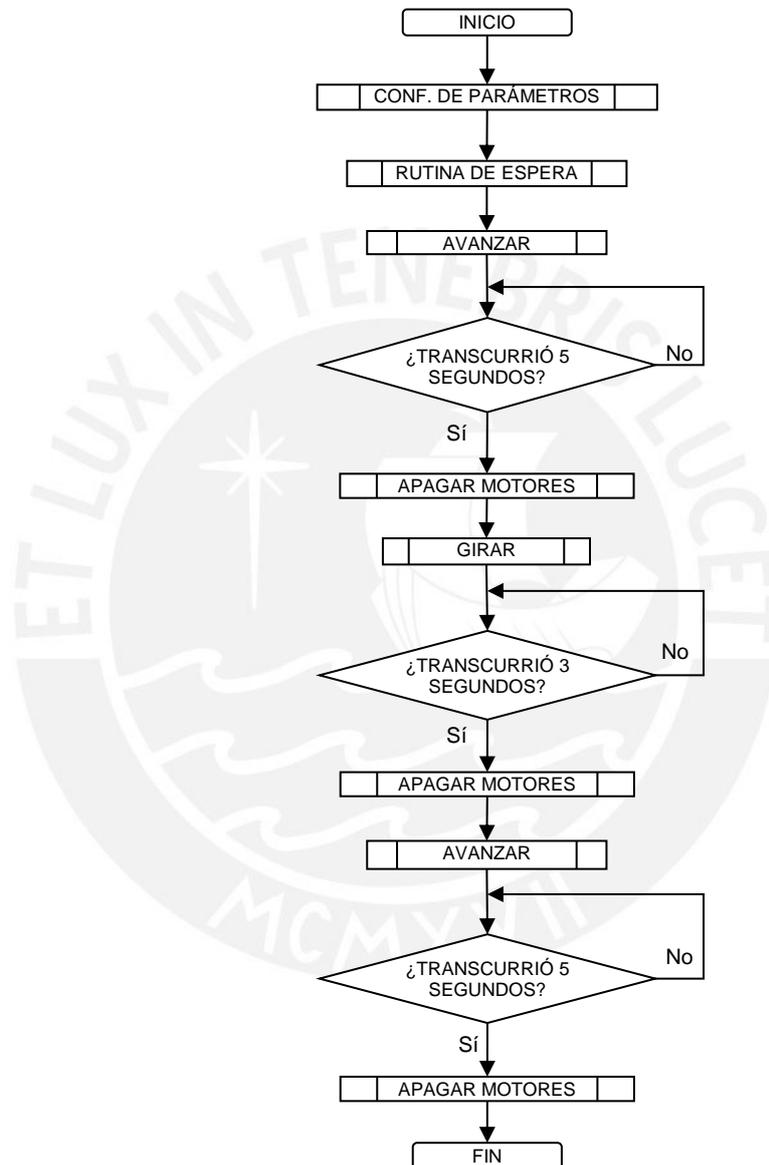


Figura 3.9.1. Diagrama de flujo del recorrido programado con microcontrolador.

Por cuestiones de seguridad, el programa inicialmente realiza una cuenta de tres segundos hasta antes de encender los motores, luego activa ambos motores en simultáneo en un mismo sentido para lograr un desplazamiento en línea recta.

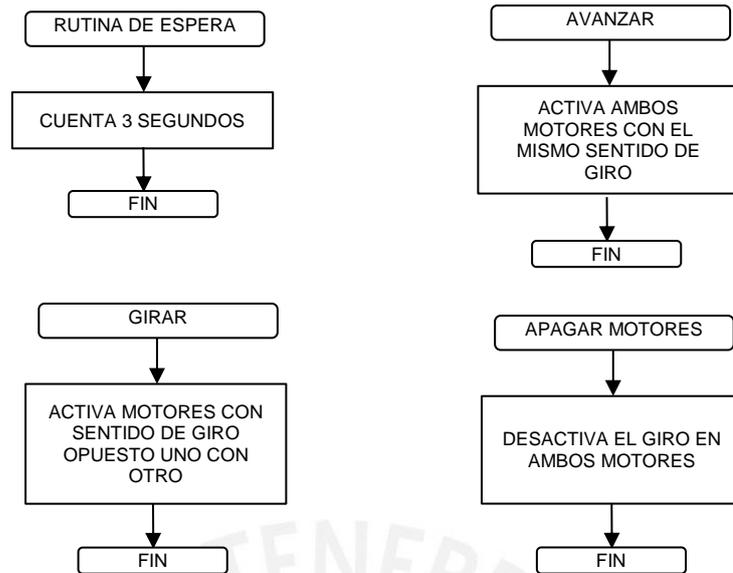


Figura 3.9.2. Diagramas de flujo de las subrutinas de control.

Posteriormente se invierte el sentido en uno de los motores para realizar un giro y continúa su comportamiento inicial, es decir ambos motores giran en el mismo sentido, hasta que finalmente los motores son desenergizados. Las subrutinas se muestran en la Figura 3.9.2. Además, cuenta con un botón de reinicio para que el programa realice el recorrido las veces que sea necesario, sobre todo para realizar las pruebas y mediciones de voltaje en los motores. La Figura 3.9.3 muestra el módulo de control.

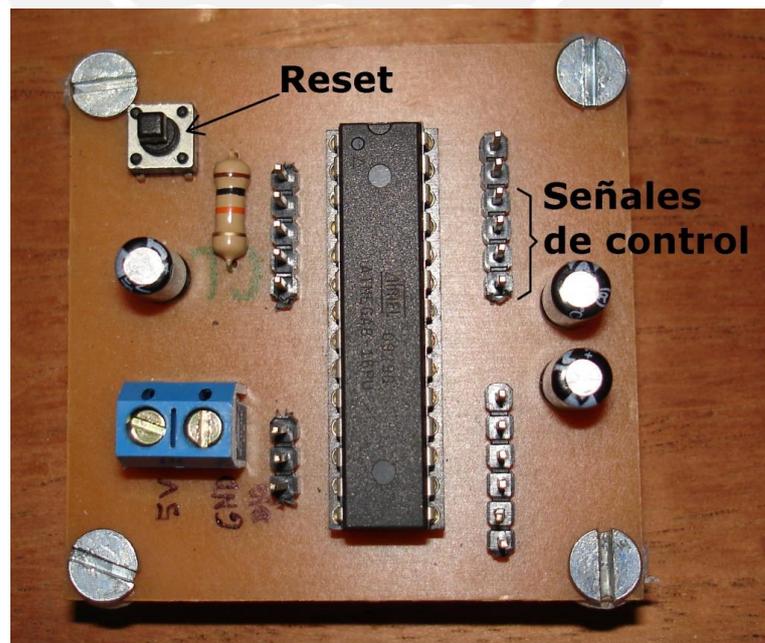


Figura 3.9.3. Módulo de control con microcontrolador ATmega8.

3.10 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Se elaboró una lista de los componentes utilizados, todos los elementos pueden encontrarse en el mercado peruano a excepción de los reguladores LDO, sin embargo se consideró varios componentes con el precio en el extranjero. Se puede apreciar en la siguiente Tabla 6 que los elementos de mayor costo son las baterías y los motores.

Tabla 6

Precios de componentes

Componente	Descripción	*\$	Cantidad	**S/.	S/.	\$	\$
4N27	optoacoplador	0.45	4			0.45	1.80
4N31	optoacoplador	0.45	2			0.45	0.90
LM324	opamp quad	0.50	1			0.50	0.50
LM2941	regulador LDO	1.25	1			1.25	1.25
KA7805	regulador 5VDC	0.29	1	1.00	1.00		
ULN2803	darlington array	1.00	1	2.50	2.50		
PC817	optoacoplador	0.60	3	1.00	3.00		
IRF540	mosfet	1.34	4	3.00	12.00		
IRF9540	mosfet	1.94	4	3.00	12.00		
Tarjetas	fabricación		5	20.00	100.00		
Atmega8		5.00	1	18.00	18.00		
Motor	24v 136RPM	135.00	2			135.00	270.00
Baterías	12v 12ah		2	150.00	300.00		
Total:				S/.	448.50	\$	274.45

*Precio de lista en el extranjero. Fuentes: www.allelectronics.com, www.jameco.com, www.superdroidrobots.com, www.futurlec.com

**Precio de lista en el mercado peruano.

El tiempo invertido para este diseño e implementación suma alrededor de 6 meses, considerando un costo mensual por servicios de S/.3000 y un tipo de cambio del dolar a diciembre de 2017 de S/.3.25 calculamos el costo total:

$$\text{Costo} = 6 * 3000 + 3.25 * 274.45 + 448.50$$

$$\text{Costo} = S/.19340.46$$

4 DISEÑO FINAL, CARACTERÍSTICAS Y PRUEBAS

En el presente capítulo se detallarán como fueron interconectadas las tarjetas diseñadas, las características más relevantes y las pruebas realizadas con cada módulo y las mediciones obtenidas.

4.1 INTEGRACIÓN DE LOS MÓDULOS

Como se explicó anteriormente, la etapa de control está interconectada a los puentes H que controlan la activación y el sentido de giro de los motores. La Figura 4.1.1 muestra las tarjetas y las conexiones realizadas.

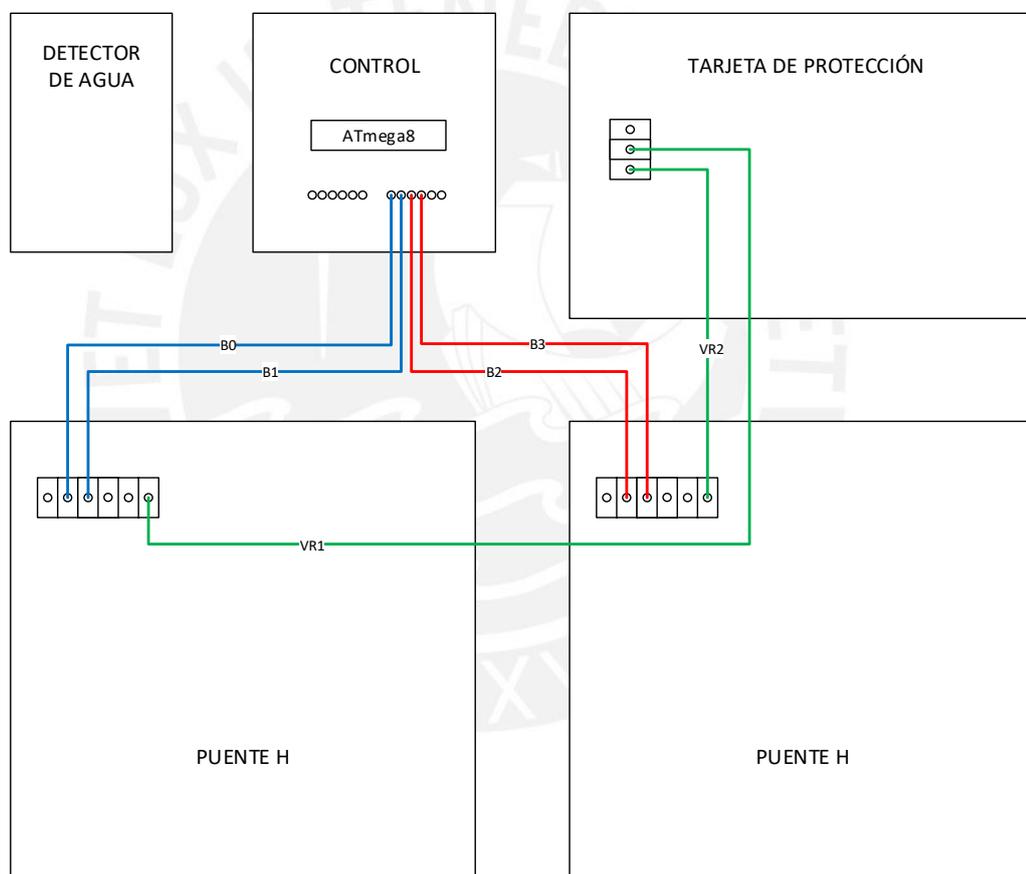


Figura 4.1.1. Integración de Módulos.

Podemos observar que el módulo de control que contiene el microcontrolador ATmega 8 controla los puentes H a través de los bits que proporcionan la información para el sentido de giro de cada motor. Adicionalmente, los puentes H cuentan con una salida que proporciona información del voltaje que presenta la resistencia de potencia, estas señales son enviadas a la tarjeta de protección para ser comparadas

con una señal de referencia que en este caso como se explicó en el capítulo anterior es de 0.6V que corresponde al voltaje que decae en el diodo Schottky.

4.2 PRUEBAS

Para el desarrollo de las pruebas se hizo uso de dos baterías de 12V y dos fuentes de 17V y 6V respectivamente. Para el sensado del agua se emplearon las dos fuentes, se empleó el integrado 7812 para acondicionar el voltaje de la fuente de 17V, el voltaje de salida que se utilizó como fuente de alimentación fue de 12.136V (ver Anexo 1). La fuente de 6V entrega 6.189V exactamente (ver Anexo 2).

4.2.1 SENSADO DEL NIVEL DEL AGUA

Se implementó el circuito detector de agua (Figura 3.6.2.1) en un protoboard. Se midió el voltaje en la salida del circuito. Las mediciones con el multímetro con los contactos del detector fuera del recipiente con agua dieron aproximadamente 0.354V, valor que interpretaremos como '0' lógico (ver Anexo 3). Luego se realizó la medición pero con los contactos sumergidos en el recipiente con agua, el resultado fue de 6.157V que interpretaremos como '1' lógico. (Ver Anexo 4). Adicionalmente se midió el voltaje en las resistencias R1 y R2 (1k Ω y 500 Ω respectivamente) con los contactos del detector sumergidos en agua, esto nos sirvió para calcular el consumo de potencia y energía. El voltaje medido en la resistencia de 1k Ω fue de 4.65V (ver Anexo 5) lo que implica una corriente de 4.65mA. Se midió el voltaje en la resistencia de 500 Ω (implementada con 2 resistencias de 1k Ω en paralelo) el cual fue de 117mV (ver Anexo 6) lo que indica que está circulando una corriente de 234 μ A. Finalmente se midió el voltaje en la salida del amplificador Darlington, este fue de 0.76V (Anexo 7), teóricamente GND, este valor es inferior a la tensión directa del optoacoplador 4N31 cuya hoja de datos indica ser 1.2V por lo tanto no conduce y se obtiene '1' lógico a la salida del circuito.

4.2.2 TARJETA DE PROTECCIÓN

La tarjeta de protección cuenta con dos comparadores para detectar el voltaje en las resistencias de potencia de los puentes H. El voltaje de referencia fue dado por un diodo Schottky cuya tensión es de aproximadamente 0.6 voltios.

Para simular la tensión que aumenta en la resistencia de potencia de los puentes H se usó un módulo analógico-digital, se generó un voltaje desde los 0V que se aumentó gradualmente hasta superar los 0.6V de modo que se pueda analizar el cambio en la señal de salida del circuito comparador.

En el primer ensayo, el voltaje proporcionado en la entrada de uno de los comparadores fue menor a 0.6 voltios, específicamente 0.27V (ver Anexo 8), dando como resultado en la salida correspondiente del circuito de protección aproximadamente un voltaje de 0.155V, que puede ser interpretado como cero lógico (ver Anexo 9). El voltaje en la entrada del comparador fue aumentado gradualmente y la salida continuó siendo 0.16 voltios, el último valor suministrado en la entrada fue de 0.56 voltios y continuó registrando 0.155V a la salida.

En la prueba siguiente se aumentó el voltaje de entrada en el comparador, al superar voltaje de referencia de 0.6 voltios se observó que la señal de salida del circuito fue de 4.945V (ver Anexo 10), pudiendo ser interpretada como una señal digital en nivel alto. La señal de entrada empleada para esta experiencia fue de 0.709V (ver Anexo 11).

Finalmente se realizaron las pruebas correspondientes al circuito detector de batería baja. En el ensayo la tarjeta de protección se encontraba alimentada por una fuente de 12 voltios regulable ya que disponíamos de un módulo analógico para llevar a cabo esta experiencia.

Para proceder a realizar la prueba se midió inicialmente el voltaje exacto de la tensión de alimentación que entregaba el módulo y el multímetro registró 12.032V (ver Anexo 12), por lo que puede ser tomado como un valor de batería cuando está completamente cargada.

La señal de salida correspondiente al detector de batería baja presentaba una tensión de 0.164V (ver Anexo 13) lo cual era de esperarse ya que, como se explicó anteriormente, cuando la batería está cargada el optoacoplador ubicado en la etapa final conduce y el voltaje de salida vendría a ser la tierra digital.

Posteriormente se procedió a disminuir el voltaje de alimentación. El circuito fue calibrado para que produzca una salida de nivel alto cuando la tensión de alimentación fuera menor a 11 voltios aproximadamente. Se procedió a medir la salida y se observó que cambio de nivel lógico '0' a '1' cuando el voltaje de alimentación descendió hasta 10.749V (ver Anexo 14).

El voltaje medido a la salida del circuito detector de batería baja fue de 4.946V (ver Anexo 15), que es la tensión de alimentación digital (5 voltios), debido a que el optoacoplador ubicado en la etapa final del detector no conduce.

4.2.3 PUENTES H CONTROLADOS POR ATMEGA 8

Las pruebas finales de los puentes H para el control de dirección de los motores fueron hechas con dos motores de 1/4 de HP de 24 voltios implementado con dos baterías de 12 voltios conectados en serie. Además, como se explicó anteriormente, fue usado un programa que simula un recorrido que invierte el sentido de giro en uno de los motores al transcurrir un tiempo determinado. Para energizar la tarjeta de control se empleó un regulador de voltaje para obtener 5 voltios de modo que el voltaje en el microcontrolador no se exceda y así se evite dañar el circuito.

Analizamos el primer caso cuando el microcontrolador envía una señal de '0' lógico a una de las entradas de control del puente H. Debido a que se tiene dos señales de control simétricas solo analizamos un lado del circuito.

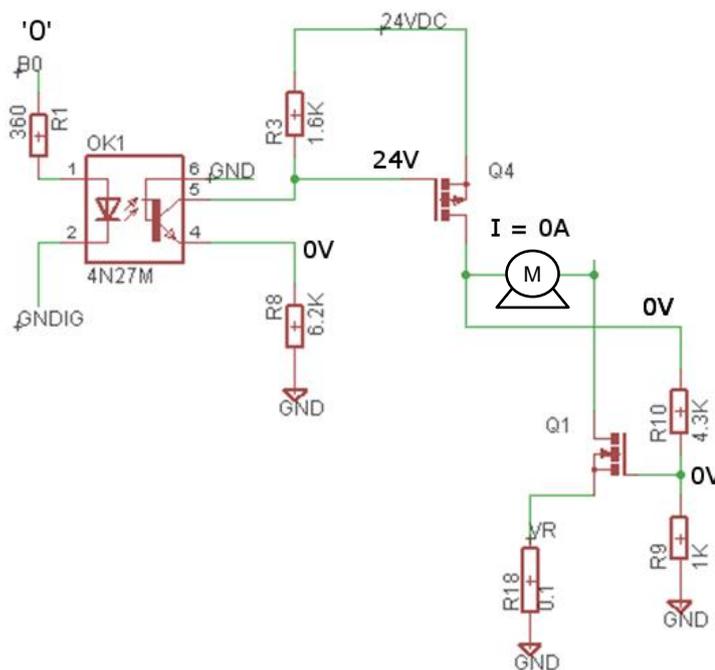


Figura 4.2.3.1. Motor inactivo.

Apreciamos en la Figura 4.2.3.1 que al ingresar '0' lógico en la señal de control, el optoacoplador no conduce lo que origina a la salida un circuito abierto, esto implica que los voltajes en la puerta y en el surtidor del MOSFET Q4 son iguales, es decir V_{GS} es 0 voltios por lo tanto no conduce corriente en el motor y se mantiene inactivo,

no hay tensión en la resistencia R10 por lo tanto los voltajes en la puerta y el surtidor del MOSFET Q1 son iguales a 0 voltios y no conduce.

El segundo caso ocurre cuando se ingresa '1' lógico en la señal de control (Figura 4.2.3.2), esto origina que el optoacoplador conduzca y se origine un divisor de voltaje entre las resistencias R3 y R8 dando una tensión de 18.4 voltios en la puerta del MOSFET Q4, esto implica un voltaje V_{GS} de 5.6 voltios, el MOSFET conduce y el motor se activa.

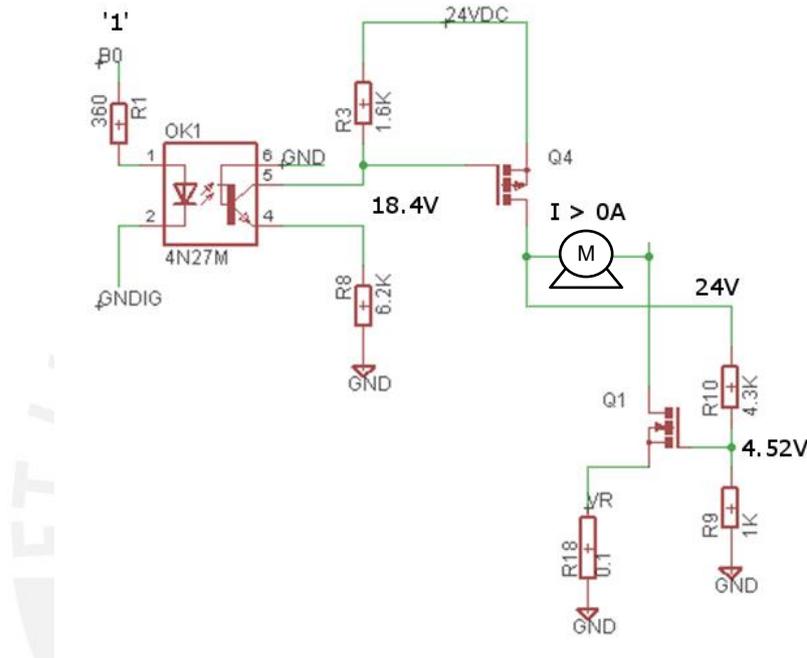


Figura 4.2.3.2. Motor en operación.

Al conducir el MOSFET Q4 se genera un divisor de voltaje entre las resistencias R9 y R10 y otorga a la puerta del MOSFET Q1 un voltaje de 4.52 voltios, es decir el V_{GS} es igual a 4.52 voltios, el MOSFET se activa y conduce corriente hacia la resistencia de potencia R18.

Las pruebas fueron realizadas tomando en cuenta dos consideraciones. La primera, que uno de los motores estaba sin carga, es decir en vacío, y la segunda, que el motor restante fue acoplado a una carga proporcionada por una llanta unida a través de poleas (Figura 4.2.3.3). Se realizaron las mediciones en las resistencias de potencias para cada caso y los resultados fueron proporcionales a la carga. En ambas mediciones el prototipo empleado para las pruebas estuvo suspendido para evitar desplazar el carro y poder medir las señales involucradas.

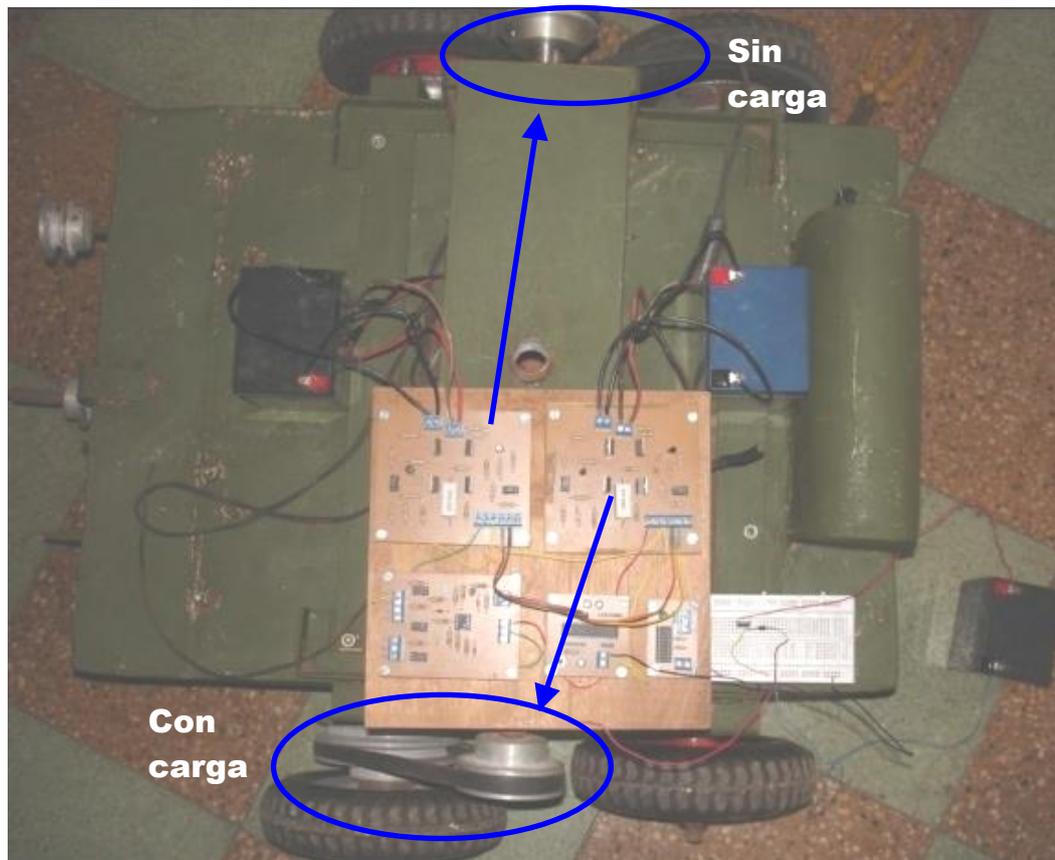


Figura 4.2.3.3. Integración de circuito con el prototipo de vehículo anfíbio.

Para el primer caso se realizó la prueba con el motor sin carga, por lo que el voltaje en la resistencia de potencia debe ser bajo. El resultado obtenido fue de aproximadamente 32.6mV (ver Anexo 16).

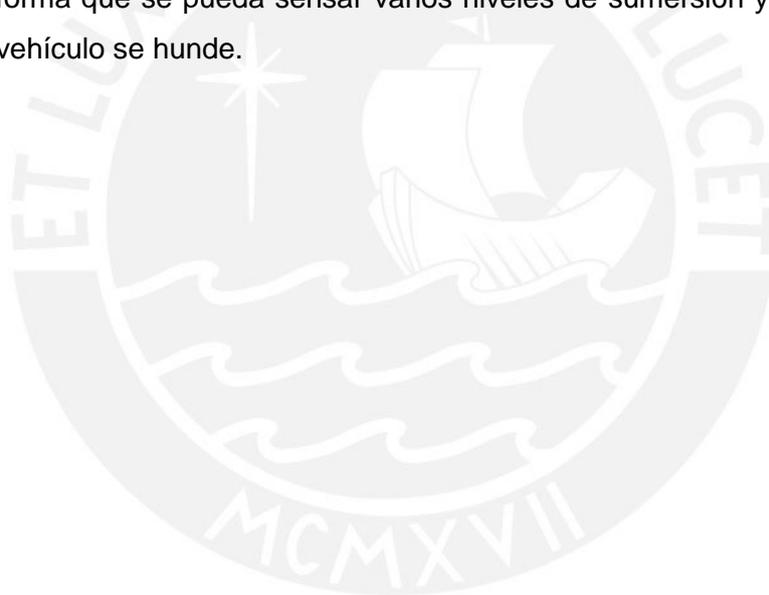
Para el segundo caso el motor se encontraba con carga y en pleno funcionamiento mostró en la resistencia de potencia un voltaje de aproximadamente 0.12V (ver Anexo 17).

CONCLUSIONES

- Se logró diseñar los módulos de electrónica de potencia para gobernar el movimiento de dos motores de corriente continua de $\frac{1}{4}$ de HP a 24VDC (aprox. 7.7 amperios) de tal modo que controle el desplazamiento y dirección de un carro anfibia.
- En el diseño y desarrollo de circuitos es indispensable lograr un aislamiento de la etapa digital con respecto a las etapas de potencia para lograr preservar el correcto funcionamiento y evitar dañar la etapa de control, esto se logró mediante el uso de optoacopladores y un circuito de protección que detectaba valores excesivos de corriente que fluían a través de los motores.
- Se diseñó un circuito que detecta la transición de tierra a agua y viceversa y emite una señal digital que puede ser usada para el control de los distintos módulos, con la finalidad de salvaguardar el carro en caso de un posible hundimiento.
- Se programó un microcontrolador para controlar los motores y mostrar las prestaciones del diseño, el programa simula un recorrido realizando cambios en la dirección del vehículo.
- El diseño cuenta con un detector de batería baja que fue calibrado y probado cuya salida se mostraba mediante un led indicador.
- Los optoacopladores 4N27 utilizados en la etapa de potencia (puente H) poseen CTR de 30%, esto debido a que no es necesario utilizar excesiva corriente para activar los mosfets. En las etapas de protección y batería baja se utilizan optoacopladores PC817 cuyo CTR es de 130%, esto debido a que son menos costosos que los anteriores y más fáciles de acoplar (el 4N27 posee 6 pines y el PC817 4 pines); sin embargo se podría considerar usar siempre optoacopladores 4n27 para hacer el diseño más eficiente.

RECOMENDACIONES

- Para aumentar la autonomía del vehículo se podría considerar el acoplamiento de dínamos en las ruedas y estas conectarse a las baterías de modo que se pueda aprovechar la energía producida por el desplazamiento, sobre todo cuando el vehículo se desplace en una pendiente cuesta abajo.
- El diseño de la etapa de control dispone de un microcontrolador con dos interrupciones externas, sin embargo, se podría usar un microcontrolador con más interrupciones y así incluir más sensores como por ejemplo de ultrasonido para detectar obstáculos y evitar colisiones.
- El diseño de la etapa de sensado del agua contempla una única entrada y el integrado ULN2804 utilizado en esta etapa puede soportar hasta 8. Se recomienda habilitar más entradas en distintas alturas del vehículo de tal forma que se pueda sensar varios niveles de sumersión y así detectar si el vehículo se hunde.



BIBLIOGRAFÍA

ATMEL CORPORATION

2013 *8-bit Atmel with 8KBytes In-System Programmable Flash. ATmega8 ATmega8L* [manual]. San Jose.

BOYLESTAD, Robert y Louis NASHELSKY

2003 *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Octava edición. México: Pearson.

CARTER, Andy

s/f *The Amphibious Jeep Story*. Consulta: 10 de febrero de 2015.
<http://www.m201.com/GPA.htm>

GUTIERRES, Carlos

2006 *Robots en la sangre. Nanotecnología*. Consulta: 1 de julio de 2014.
<http://www.onsalus.com/robots-en-la-sangre-nanotecnologia/29/articulo>

KIEHNE, H. A.

2003 *Battery Technology Handbook*. Segunda Edición. New York: Marcel Dekker.

LATHI, B.P.

1986 *Sistemas de comunicación*. Primera edición. México D.F.: Nueva editorial interamericana.

MERIAM, J.L. y KRAIGE L.G.

1998 "Rozamiento". *Mecánica para Ingenieros. Estática*. Tercera edición. Barcelona: Editorial Reverté, pág. 315.

MILWEB

[2009] *DUKW - WW2 Amphibious Truck*. Consulta: 8 de febrero de 2015.
<http://www.milweb.net/features/dukw.php>

RESNICK, Robert, David HALLIDAY y Kenneth S. KRANE

2009 "Estática de fluidos". *Física*. Cuarta edición. México: Grupo Editorial Patria, pp. 331-343.

TRYCKARE, Tre

1979 "Propulsión". *Las Artes de la Mar: Enciclopedia Náutica Ilustrada*. Traducido por Federico Piera. Barcelona: Blume, pp. 144-168.

UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (UCAR)

2003 *Robots Watch out for Poisonous Plankton!* Consulta: 3 de julio de 2014.
http://www.windows2universe.org/headline_universe/red_tide.html

UNIVERSITY OF BATH

2008 *Crab-like robot could benefit undersea exploration*. Consulta: 18 de julio de 2014.
<http://www.bath.ac.uk/news/2008/3/18/crabrobot.html>

VANGUARDIA

2009

Se 'estrena' robot anfibio en pozas de Cuatrociénegas. Consulta: 5 de agosto de 2014.

http://archivo.vanguardia.com.mx/se_estrena_robot_anfibio_en_pozas_de_cuatrociénegas-446200.html

