



GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

***” Algoritmos de guiado de barco a escala mediante aplicación móvil. ”***

AUTOR:

**Mario Moyano Romero**

TUTOR:

**Prof. Andrés Roldán Aranda**

Dpto:

**Electrónica y Tencologías de Computación**

Curso Académico:

2023/2024



Mario Moyano Romero, 2023/2024

© 2023/2024 by Mario Moyano Romero, Andrés M. Roldán Aranda:  
” Algoritmos de guiado de barco a escala mediante aplicación móvil. ”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) license.


This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the license:


**You are free to:**

- Share** — copy and redistribute the material in any medium or format.
- Adapt** — remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially.

The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

**Under the following terms:**

 **Attribution** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

 **ShareAlike** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

**No additional restrictions** — You may not apply legal terms or technological measures that legally restrict others from doing anything the license permits.

To view a **complete** copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





# **Algoritmos de guiado de barco a escala mediante aplicación móvil**

**Mario Moyano Romero**

## **KEYWORDS:**

GranaSAT, Altium Designer 24, SolidWorks, LTSpice, C++, H bridge, GPS, GPRS, Hardware, Firmware, Embedded System, ESP32, PCB.

## **ABSTRACT:**

*Posidonia oceanica* is a marine plant endemic to the Mediterranean Sea that forms meadows at depths of between 20 and 30 meters. This species plays a crucial role in marine ecosystems, acting as a natural indicator of water quality and contributing to the conservation of coastal flora and fauna.

Divers from the Aula del Mar CEI-MAR-UGR frequently visit the *Posidonia oceanica* meadows to collect samples at strategic points and evaluate water quality. Due to their shallow depth, locating these meadows from the water's surface is relatively easy. However, on days with suspended sediments, underwater visibility is reduced, making this task more difficult.

The purpose of this Final Degree Project is to provide a guidance device that allows divers to accurately identify the location of the meadows. Additionally, this device will enable precise knowledge of the coordinates where different samples are collected.

To develop this device, a remote-controlled scale boat originally intended for recreational fishing has been used. The boat's original electronics were removed and replaced with a custom-made design, suited to the specific needs of this project and equipped with more modern technology.

This design allows the user to remotely control the boat via GPRS, using a mobile application developed to specify the GPS coordinates to be reached. Thus, the boat autonomously navigates to the desired point. The circuit will be implemented on a PCB and controlled by an ESP32 programmed in C++.



# **” Algoritmos de guiado de barco a escala mediante aplicación móvil. ”**

**Mario Moyano Romero**

## **PALABRAS CLAVE:**

GranaSAT, Altium Designer 24, SolidWorks, C++, Puente H, GPS, GPRS, Hardware, Firmware, Sistemas Embebidos, ESP32, PCB.

## **RESUMEN:**

La Posidonia oceánica es una planta marina endémica del Mar Mediterráneo que forma praderas a una profundidad de entre 20 y 30 metros. Esta especie desempeña un papel crucial en los ecosistemas marinos, ya que actúa como un indicador natural de la calidad del agua y contribuye a la conservación de la flora y fauna del litoral.

Los submarinistas del Aula del Mar CEI-MAR-UGR visitan frecuentemente las praderas de Posidonia para tomar muestras en puntos estratégicos y evaluar la calidad del agua. Al estar ubicadas a poca profundidad, su localización desde la superficie del agua es sencilla. Sin embargo, en días con sedimentos en suspensión, la visibilidad del fondo marino se reduce, lo que complica esta tarea.

La finalidad de este Trabajo Fin de Grado es ofrecer un dispositivo de guiado que permita a los submarinistas identificar la ubicación exacta de las praderas. Además, este dispositivo permitirá conocer con certeza las coordenadas de los puntos donde se recogen las distintas muestras.

Para llevar a cabo este dispositivo, se ha utilizado un barco a escala teledirigido destinado originalmente para fines de pesca recreativa. A este barco se le ha extraído toda la electrónica original, que ha sido reemplazada por un nuevo diseño personalizado, adaptado a las necesidades específicas de este proyecto y equipado con tecnología más moderna.

Este diseño permite al usuario controlar el barco de manera remota mediante GPRS, utilizando una aplicación móvil desarrollada para indicar las coordenadas GPS a alcanzar. Así, el barco se dirige de forma autónoma hasta el punto deseado. El circuito será implementado en una PCB y controlado por un ESP32 programado en C++.





## *Agradecimientos*

Los logros individuales no serían posibles sin el apoyo de las personas que nos rodean. Por ello, es importante expresar mi gratitud a todos aquellos que han contribuido a que este Trabajo Fin de Grado haya sido posible.

Quiero agradecer a mis padres, Luisa y Ángel, por ser mis raíces; ellos me han inculcado los valores y la educación necesarios para llegar a donde estoy hoy, además de brindarme su apoyo y cariño incondicional a diario. A mi hermana Ángela, por ser mi fiel compañera y ayudarme a mantener vivo a mi niño interior. Y a Sara, por mostrarme su amor y ofrecerme su ayuda en incontables ocasiones.

A mis amigos, por hacerme vivir momentos únicos donde las risas y los buenos momentos hablan por sí solos. Gracias a ellos recupero la energía para seguir trabajando en todo lo que me propongo.

A mis compañeros de GranaSAT, por hacer que mi estancia en el laboratorio haya sido lo más amena posible y por el sentimiento de familia que he desarrollado junto a ellos.

Y por último, pero no menos importante, a mi tutor Andrés María Roldán Aranda por su infinita paciencia desde el primer día y por brindarme una oportunidad que me ha ayudado a crecer tanto personal como profesionalmente.



# Índice general

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Licencia</b>                               | <b>IV</b>    |
| <b>Autorización de defensa</b>                | <b>V</b>     |
| <b>Autorización de depósito en biblioteca</b> | <b>VII</b>   |
| <b>Resumen (Inglés)</b>                       | <b>IX</b>    |
| <b>Resumen (Español)</b>                      | <b>XI</b>    |
| <b>Agradecimientos</b>                        | <b>XIII</b>  |
| <b>Índice general</b>                         | <b>XV</b>    |
| <b>Índice de figuras</b>                      | <b>XIX</b>   |
| <b>Índice de tablas</b>                       | <b>XXIII</b> |
| <b>1. Introducción</b>                        | <b>1</b>     |
| 1.1. GranaSAT . . . . .                       | 1            |
| 1.2. Motivación . . . . .                     | 2            |
| 1.3. Posidonia oceánica . . . . .             | 2            |
| 1.4. Objetivos . . . . .                      | 4            |
| 1.5. Descripción de capítulos . . . . .       | 5            |
| <b>2. Descripción del barco</b>               | <b>6</b>     |
| 2.1. Motor DC . . . . .                       | 7            |
| 2.1.1. Tipo de motores . . . . .              | 7            |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.1.1.1.  | Motores con escobillas . . . . .                      | 7         |
| 2.1.1.2.  | Motores sin escobillas . . . . .                      | 8         |
| 2.1.1.3.  | Otros tipos . . . . .                                 | 9         |
| 2.1.2.    | Principio de funcionamiento . . . . .                 | 9         |
| 2.1.3.    | Motor DC del barco . . . . .                          | 9         |
| 2.2.      | Servomotor . . . . .                                  | 13        |
| 2.3.      | Iluminación . . . . .                                 | 17        |
| 2.3.1.    | Reglamento de luces de navegación y señales . . . . . | 18        |
| 2.3.2.    | LED 5mm . . . . .                                     | 19        |
| 2.3.3.    | LED de potencia . . . . .                             | 20        |
| 2.4.      | Batería . . . . .                                     | 23        |
| <b>3.</b> | <b>Diseño del sistema</b> . . . . .                   | <b>27</b> |
| 3.1.      | Diseño electrónico . . . . .                          | 27        |
| 3.1.1.    | Unidad de Microcontrol (MCU) . . . . .                | 27        |
| 3.1.2.    | Conectividad GPRS y GPS . . . . .                     | 32        |
| 3.1.2.1.  | Receptor GPS . . . . .                                | 32        |
| 3.1.2.2.  | Trama NMEA . . . . .                                  | 34        |
| 3.1.2.3.  | Módulo GY-NEO6MV2 . . . . .                           | 35        |
| 3.1.2.4.  | Módulo de conexión inalámbrica . . . . .              | 37        |
| 3.1.2.5.  | Módulo SIM800L . . . . .                              | 38        |
| 3.1.3.    | Módulo de Reloj en Tiempo Real (RTC) . . . . .        | 40        |
| 3.1.4.    | Módulo OLED SSD1306 . . . . .                         | 42        |
| 3.1.5.    | Unidad de Medida Inercial (IMU) . . . . .             | 43        |
| 3.1.6.    | Servomotor . . . . .                                  | 45        |
| 3.1.7.    | Monitorización de corriente y voltaje . . . . .       | 45        |
| 3.1.7.1.  | Estimación del Estado de Carga (SOC) . . . . .        | 49        |
| 3.1.8.    | Circuito de encendido . . . . .                       | 50        |
| 3.1.9.    | Circuito cargado de batería . . . . .                 | 52        |
| 3.1.10.   | Control del motor DC . . . . .                        | 54        |
| 3.1.11.   | Iluminación . . . . .                                 | 66        |















































































## Capítulo 3

# Diseño del sistema

Dado que con la circuitería original del barco no se pueden conseguir los objetivos explicados anteriormente, es necesario diseñar una nueva circuitería para poder alcanzar los requisitos impuestos en las primeras fases del desarrollo del proyecto. Para ello se han llevado a cabo las siguientes fases:

- **Elección de componentes:** Una vez identificadas las funcionalidades del barco, es necesario buscar componentes y módulos que permitan realizar las distintas tareas. También se debe decidir cuáles de los componentes originales del barco se van a reutilizar, todos ellos descritos en el 2. En este proyecto, se utilizarán diferentes módulos montados en pequeñas placas que se pueden conectar fácilmente a la circuitería principal. Esto ofrece ventajas significativas, ya que en muchos casos es más rentable económicamente utilizar estos módulos ya montados en lugar de diseñar y ensamblar el circuito desde cero. Además, muchos de estos módulos están formados por componentes cuyo precio individual puede ser elevado, además de ser difíciles de soldar con los recursos disponibles en el laboratorio.
- **Diseño electrónico:** Una vez seleccionados los componentes o módulos, es fundamental estudiar sus características eléctricas para garantizar que pueden soportar el régimen de corriente y tensión que hay en los circuitos. Además, es necesario revisar las recomendaciones de los fabricantes para determinar si es necesario añadir componentes auxiliares que garanticen un funcionamiento óptimo.
- **Diseño de la PCB:** Después de generar los esquemáticos durante la fase de diseño electrónico, se procede al diseño de la placa principal del barco. En esta etapa es necesario definir las dimensiones y la forma de la placa, así como la distribución de los distintos componentes. Ya que hay que ceñirse tanto a las restricciones de espacio de la cavidad interna del barco, como a las limitaciones específicas que tienen ciertos componentes a la hora de su colocación.
- **Diseño del sistema de anclaje:** Esta etapa se desarrolla de manera simultánea con el diseño de la PCB. Para asegurar una fijación correcta de la placa al chasis del barco, es necesario diseñar un sistema que sea efectivo, rápido y fácil de ensamblar. Para la creación de la pieza es importante tener en consideración tanto las dimensiones de la placa, como el volumen de la cavidad interna del barco.

### 3.1. Diseño electrónico

#### 3.1.1. Unidad de Microcontrol (MCU)

Para productos controlados automáticamente como es el caso de este proyecto, es necesario un dispositivo que actúe como ordenador. El cual posea una memoria donde almacenar datos relevantes, ejecute órdenes y tenga pines



genéricos Entrada/Salida de Propósito General (GPIO) que se puedan utilizar para conectar los distintos periféricos externos del barco a la unidad de control.

En los sistemas embebidos, esto es posible gracias a la utilización de un MCU. Un MCU es un microcontrolador o circuito integrado de estado sólido el cual trae como mínimo un procesador, un módulo de memoria, una interfaz de comunicación, y algunos GPIO. Estos módulos pueden variar según la tecnología del microprocesador, así como diversos periféricos internos como relojes internos, osciladores o ADC que incluyen algunos de ellos.

El MCU funciona principalmente mediante la ejecución de un programa guardado en un módulo de memoria no volátil en específico. En cuanto a las aplicaciones del MCU, se puede utilizar en dispositivos médicos, en sistemas de control de motores, así como en circuitos de señales mixtas o IoT [30].

A la hora de escoger un MCU para una finalidad en concreto, hay que tener en consideración sus especificaciones básicas:

- **Procesador:** Mientras que para trabajos sencillos se puede utilizar microcontroladores de un solo procesador, en el caso de tareas complejas es necesario utilizar un MCU de varios núcleos de procesadores, para poder dividir la ejecución de las tareas en los distintos procesadores que posee.
- **Periféricos internos:** En ocasiones es necesario que el MCU disponga de módulos encargados de hacer tareas en específico. Como puede ser el caso de un convertidor analógico/digital, reloj interno o un módulo de conectividad Wi-Fi.
- **Pines de propósito general entrada/salida:** Es importante conocer los distintos dispositivos que van a tener que ser controlados por el MCU, ya que este tiene unos pines limitados para uso general. Por lo que dependiendo de los dispositivos, será necesario un MCU con más o menos GPIO.
- **Interfaz de comunicación:** Los IC que se utilizan para las distintas tareas tienen una interfaz de comunicación en específico, con la que se comunican con la unidad central o MCU. Por lo que es necesario asegurarse que el MCU elegido soporta dicha interfaz de comunicación.

Hay una gran variedad de MCU en el mercado, sin embargo, en este caso se ha centrado la atención en aquellos que sean conocidos y tengan precios asequibles. Los MCU más comunes son el ATMEGA328p, que es el que se utiliza en las placas de Arduino, además del ESP8266 y el ESP32. Los cuales son utilizados en una gran variedad de módulos ensamblados utilizados con fines educativos.

En el caso de este proyecto, se ha utilizado un ESP32 ya que este es una evolución del ESP8266. Presentando mejoras en prácticamente todos los aspectos, así como la incorporación de un procesador de doble núcleo, a diferencia del procesador de un solo núcleo que utiliza el ESP8266.



**Figura 3.1** – MCU utilizado para el proyecto

En el diseño de años anteriores, se utilizó el ESP32-WROOM-32D-N4. Sin embargo, el propio fabricante recomienda no usar este para nuevos diseños, sustituyéndolo por el MCU ESP32-WROOM-32E-N4. Ambos poseen las mismas especificaciones (tabla 3.1) y dimensiones. Sin embargo, el recomendar reemplazarlo puede ser debido a que se han abordado en esta nueva evolución problemas de obsolescencia, o se ha reducido el coste de producción. Así como también puede ser debido a que hay una menor demanda del MCU no recomendado.

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Nombre                   | ESP32-WROOM-32E-N4<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Procesador               | Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo                |
| Memoria Flash [MB]       | 4   |
| SRAM [KB]                | 520   |
| Interfaces               | SPI, I2C, I2S, UART                                 |
| Tensión alimentación [V] | 3-3.6   |
| Corriente consumida [mA] | Típica: 68<br>Máxima: 500                           |
| Dimensiones [mm]         | 18 x 25.5   |

Tabla 3.1 – Especificaciones ESP32-WROOM-32E-N4

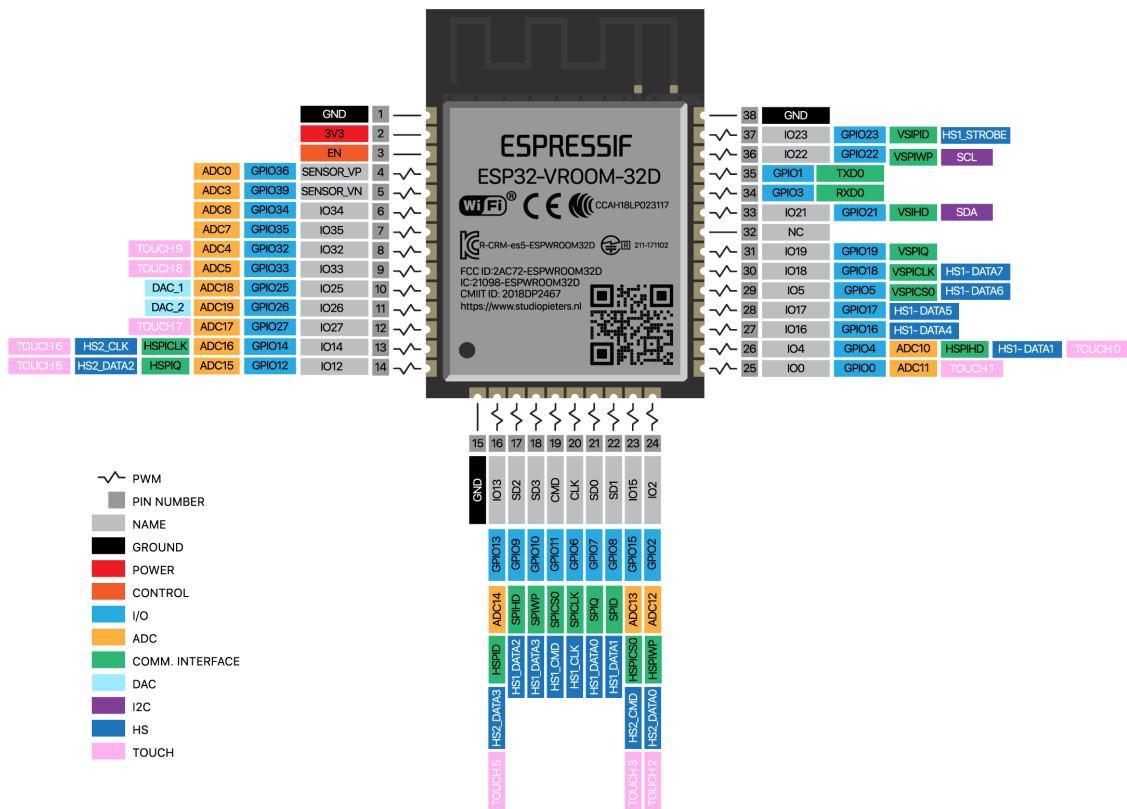


Figura 3.2 – Distribución de pines en el ESP32 [7]

Este MCU cuenta con 34 pines GPIO físicos, los cuales se pueden utilizar como pines de entrada/salida de propósito general, o conectarse a la señal de alguno de los periférico interno del ESP32 ilustrados en la figura 3.3. Sin embargo, hay ciertos pines que están conectados a memorias del MCU, o son utilizados como pines de configuración. Por lo que hay que prestar atención a estos GPIO ya que estos pueden presentar un comportamiento no deseado, sobre todo durante el arranque del MCU, o durante un reset. Para más información consultar el [Manual de Referencia Técnica](#) del ESP32.

|   |  |
|---|--|
| Pines de configuración                  | GPIO0, GPIO2, GPIO5, GPIO12 (MTDI) y GPIO15 (MTDO) |
| Pines conectados a la memoria flash SPI | GPIO6-11   |
| Pines de solo entrada                   | GPIO34-39  |
| Pines utilizados para depurar           | GPIO1(TXD), GPIO3(RXD)                             |

**Tabla 3.2** – Pines de uso reducido en el ESP32 [21]

Con respecto a la tabla 3.2, los pines de configuración determinan el modo de arranque del dispositivo, así como otros ajustes iniciales del sistema. Cada pin de configuración tiene ajustado un valor binario de fábrica, de manera que tendrán un valor alto o bajo de voltaje dependiendo si están conectados a una resistencia interna de pull-up o pull-down respectivamente. Estos pines mantienen el valor de fábrica si están conectados a un circuito externo de alta impedancia, o no están conectados directamente. Mientras que si el usuario utiliza circuitos de resistencias externas de pull-up o pull-down, su valor puede ser modificado.

Por otro lado, los pines GPIO6-11 que están conectados memoria flash SPI, no son recomendados usarlos según las directrices del fabricante. Estos no se pueden usar bajo ningún concepto si se utiliza la interfaz de comunicación SPI. Sin embargo, dado a que en este proyecto no se utiliza esta interfaz, se pueden programar como salidas. Con el inconveniente de en el arranque, o cuando el MCU entra en modo descarga para cargar el firmware estos cambian su de valor de forma arbitraria, teniendo ya control sobre estos cuando el programa está cargado en el MCU. Por lo que en estos pines, solo se deben conectar aquellos componentes que no importen que se activen de forma descontrolada durante un periodo de tiempo.

En cuanto a los GPIO34-39, solo pueden ser configurados como entradas, además de que no tienen habilitado el software necesario para utilizar funciones de pull-up o pull-down. Por lo que hay que tener esto en mente para que a la hora de hacer la asignación de pines no se utilicen estos como salidas.

Entre los distintos periféricos internos que incluye el ESP32 encontramos 18 canales de convertidores analógico-digital de 12 bits, 2 canales de convertidores digital-analógico de 8 bits, 3 interfaces UART, 2 interfaces I2C y 16 canales de salidas PWM (figura 3.3).

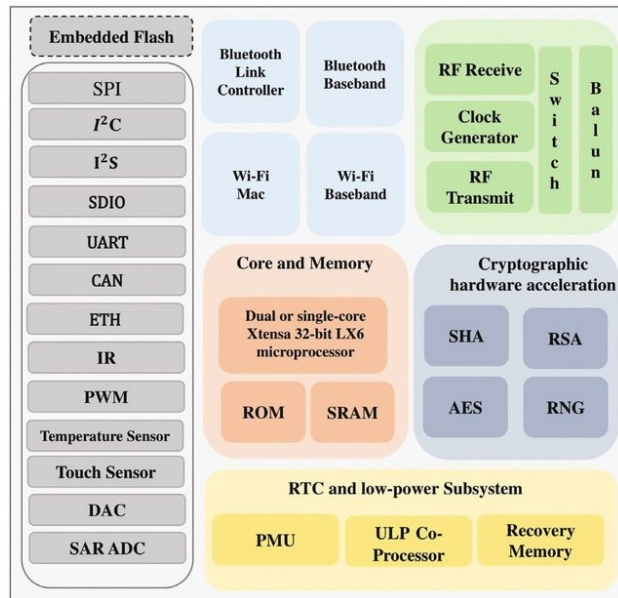


Figura 3.3 – Diagrama de bloques del ESP32 [8]

Como componentes externos adicionales, se deben de colocar dos condensadores cerámicos de desacoplo. Estos condensadores se utilizan para desacoplar señales de AC de señales DC, eliminando el ruido que pueda existir en la señal de alimentación y protegiendo de esta manera al microcontrolador alimentándolo con una alimentación DC pura [31].

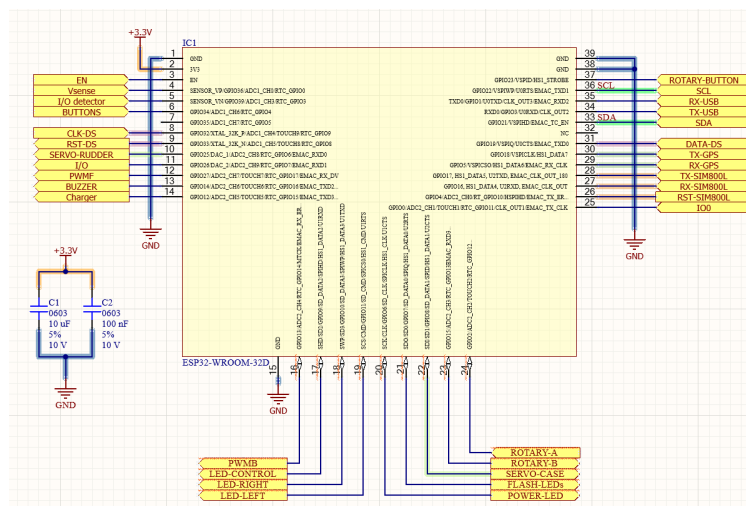


Figura 3.4 – Circuito del ESP32

Como se puede ver en la figura 3.4, prácticamente todos los pines de propósito general del ESP32 han sido utilizados. Por lo que pensando en posibles desarrollos en un futuro en el que se necesiten nuevos pines, se han buscado distintas alternativas de expansores de entradas y salidas por si son necesarios. El uso de expansores de

GPIO, es una manera efectiva y rentable económicamente de controlar una gran cantidad de señales de periféricos. Gracias a estos el usuario puede hacer uno de varios GPIO extra, dejando libres los pines del microprocesador para funciones más importantes.

En los GPIO de estos expansores hay un retraso el cual hay que tener en cuenta, de forma que en ellos se deben conectar componentes para los cuales el retraso introducido no cause problemas en su correcto funcionamiento. Tras realizar una búsqueda de expansores de puertos, han sido sugeridos los presentados en la tabla 3.3.

| Nombre                          | PCA9535<br><a href="#">Hoja de datos</a> | PCA9557<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
|---------------------------------|--|--|
| Tipo de Dispositivo             | Expansor de puertos 16 bits              | Expansor de puertos 8 bits               |
| Número de Entradas/Salidas      | 16 pines de E/S configurables            | 8 pines de E/S configurables             |
| Interfaz de Comunicación        | I2C/SMBus                                | I2C/SMBus                                |
| Rango de Voltaje de Operación   | 2.3 V a 5.5 V                            | 2.3 V a 5.5 V                            |
| Frecuencia de Operación del I2C | Hasta 400 kHz                            | Hasta 400 kHz                            |

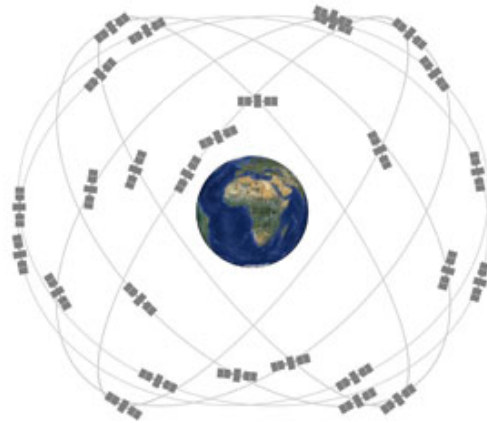
**Tabla 3.3** – Expansores de pines sugeridos

### 3.1.2. Conectividad GPRS y GPS

Para llevar a cabo estas tareas, se necesita un sistema con tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y otro dispositivo con tecnología GPRS (Servicio General de Radiocomunicaciones por Paquetes). De manera que mientras el GPS se utiliza para navegación y seguimiento, el GPRS se emplea para transmitir de datos sobre redes móviles. Permitiendo el acceso a Internet y la comunicación de datos, como mensajes y navegación web, a través de la red GSM (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles).

#### 3.1.2.1. Receptor GPS

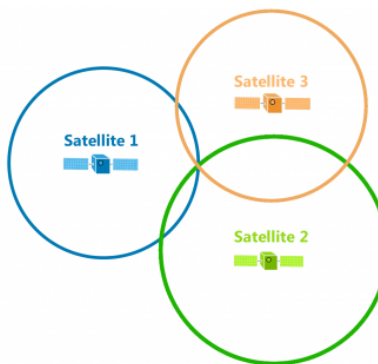
Un receptor GPS es un módulo que recibe señales de radio, provenientes de satélites del segmento espacial. El segmento espacial consiste en una constelación de al menos 24 satélites GPS, donde cada uno de ellos están repartidos en 6 planos orbitales diferentes orbitando a una altura de 20000 Km. En cada plano orbital hay cavidad para 4 satélites, y cabe la posibilidad de que algunos de estos planos sean ampliables para que puedan incorporarse a él hasta 6 satélites. Aunque en la constelación principal solo son considerados 24 satélites, estos adicionales pueden servir para mejorar la comunicación con los receptores o para suplir la función de algún satélite de la constelación principal cuando son sometidos a tareas de reparaciones o mantenimiento. De manera de que, desde cualquier punto de la Tierra, siempre hay al menos 4 satélites pertenecientes a esta constelación visibles gracias a como están distribuidos [9].



**Figura 3.5** – Constelación de satélites GPS [9]

Los conceptos que hay detrás del posicionamiento por GPS son sencillos. El primero de ellos es la trilateración, mientras que el segundo es la relación que hay entre la velocidad, el tiempo y la distancia.

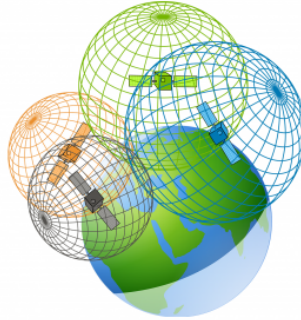
La trilateración se basa en determinar la ubicación donde está situado un receptor GPS, conociendo la distancia de dicho receptor respecto a 4 satélites diferentes. Suponiendo un primer ejemplo bidimensional, un receptor en funcionamiento detecta la señal de un satélite. Por lo que a partir de esta señal, el receptor puede calcular la distancia específica con respecto al satélite. Sin embargo, al conocer solo la distancia y no la dirección (ángulo), se deduce únicamente que el receptor se encuentra sobre cualquier punto de una circunferencia cuyo centro es la ubicación conocida del satélite que envió la señal, y el radio es la distancia específica que separa el receptor del satélite. Por lo que en este caso bidimensional si se conoce la distancia del receptor con respecto 3 satélites al menos, lo que se obtiene son tres circunferencias. Donde el punto de intersección de los 3 radios, es la ubicación del receptor en el caso bidimensional.



**Figura 3.6** – Ejemplo de trilateración 2D [10]

En cambio, en el mundo real lo que se tiene es un espacio tridimensional. En este caso, lo que define la distancia entre el receptor y el satélite es una esfera cuyo centro es la ubicación del satélite, y el radio la distancia específica entre el receptor y el satélite, de manera que el receptor puede estar situado en cualquier punto de la superficie de la esfera. En este caso al conocer la distancia del receptor con respecto a tres satélites, se obtienen tres esferas las cuales intersecan en dos puntos específicos. Esos dos puntos coinciden en latitud y longitud, pero no en altitud. Por lo que hace falta la información de un cuarto satélite para que el punto de intersección entre las cuatro esferas se reduzca a

uno solo, lo que permite conocer con precisión tanto la latitud y longitud, como la altitud donde se sitúa el receptor. Este proceso tridimensional es la base del funcionamiento del posicionamiento por GPS que utilizan los dispositivos que usamos diariamente [32].



**Figura 3.7** – Ejemplo de trilateración 3D [10]

Sin embargo, no hay un método directo para conocer la distancia exacta entre el receptor y un satélite. Por lo que se recurre al segundo concepto en el que se basa el posicionamiento por GPS, que es la relación entre la velocidad, tiempo y distancia.

Las señales radio emitidas por los satélites viajan a la velocidad de la luz, por lo que al conocer el tiempo que transcurre desde que es emitida por el satélite, hasta que un receptor la capta. Se puede calcular la distancia que separa a ambos mediante la ecuación 3.1.1 [33]:

$$Distancia = Velocidad \cdot Tiempo \quad (3.1.1)$$

Una vez que se obtiene la distancia entre el receptor y al menos 4 satélites, es posible determinar la posición tridimensional del receptor sobre la superficie de la Tierra mediante la trilateración. Completando así el proceso de posicionamiento GPS.

### 3.1.2.2. Trama NMEA

La Asociación Nacional de Electrónica Marina (NMEA) es una organización que se dedica a establecer estándares para sistemas electrónicos marinos. Siendo esta asociación la que desarrolló y estandarizó el protocolo de tramas NMEA.



**Figura 3.8** – Logo de NMEA [11]

Toda la información que recibe el receptor durante el posicionamiento GPS, es procesada y entregada como salida en forma de una trama estandarizada, utilizada por todos los fabricantes de módulos GPS. Al estar los datos procesados según este formato, se generan cadenas de datos que son fácil de interpretar por usuarios familiarizados con este sector. Esto hace que el desarrollo del firmware sea más efectivo para el personal encargado, ya que no es necesario elaborar un firmware customizado e único dependiendo de la tecnología o fabricante del receptor GPS. Un mismo firmware puede ser utilizado para una amplia gama de tipos de receptores y tecnologías. Estas tramas pueden transmitirse mediante distintas interfaces de comunicación como pueden ser USB, Wi-Fi, Bluetooth, entre otras [34].

Sin embargo, la trama de datos NMEA tiene un inconveniente. Para quienes son inexpertos en este ámbito, puede resultar ser un poco complejo. Esto es debido a que una trama NMEA puede estar compuesta por diferentes tipos de datos, donde cada uno de ellos hace referencia a un parámetro específico.

```
$GPRMC,085355.00,A,3711.34808,N,00336.34207,W,0.122,,070524,,A*6E
$GPVTG,,T,,M,0.122,N,0.227,K,A*25
$GPGGA,085355.00,3711.34808,N,00336.34207,W,1,08,1.10,697.8,M,46.8,M,,*45
$GPGSA,A,3,28,29,31,25,26,18,27,16,,,,,1.74,1.10,1.35*0C
$GPGSV,4,1,13,01,59,34,W,085357.00,A,A*7C
```

**Figura 3.9** – Trama NMEA obtenida mediante el receptor GPS GY-NEO6MV2

En la figura 3.9 se muestra una trama NMEA sacada por la terminal, obtenida como salida del receptor GPS que se dispone en el laboratorio para este proyecto (sección 3.1.2.3). Como se puede observar, cada trama está formada por varias cadenas de caracteres, donde los parámetros están separados por comas. Sin embargo, las cadenas que aparecen en la figura no son las únicas, esto depende también de la calidad del receptor GPS entre otras cosas. Las cadenas se distinguen entre sí porque cada una empieza con el carácter '\$', y termina con lo que se conoce como un retorno de carro o de línea.

Dentro de las cadenas, la que empieza por '\$GPGGA' es la más utilizada. Ya que contiene la información básica y necesaria para realizar tareas de navegación. Los parámetros más importantes que ofrece son la longitud, latitud, y altitud del receptor GPS.

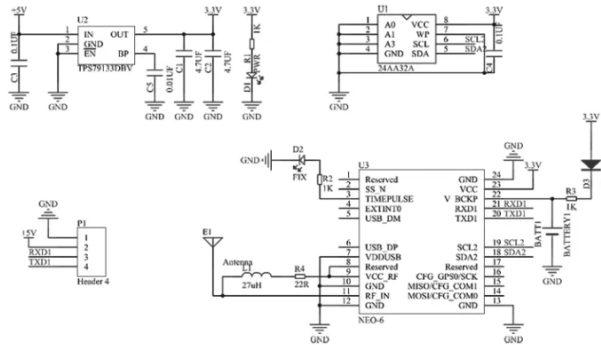
### 3.1.2.3. Módulo GY-NEO6MV2

El módulo GPS GY-NEO6MV2 es el receptor GPS que ha sido utilizado para este proyecto. Este módulo es el más típico para este tipo de proyectos electrónicos a no muy alto nivel, ya que tiene un precio bajo y unas dimensiones reducidas. Además, es el que se dispone en el laboratorio, por lo que se ha optado por él con una mayor razón pensando en aprovechar al máximo el material ya disponible.





(a) Módulo GPS utilizado



(b) Esquemático del módulo [35]

**Figura 3.10** – Módulo GPS GY-NEO6MV2

| Nombre                             | Módulo GPS GY-NEO6MV2<br><a href="#">Hoja de datos del IC</a> |
|------------------------------------|---|
| Tensión de alimentación [V]        | 3.3 a 6   |
| Corriente de consumo [mA]          | Típica: 51.85<br>Máxima: 74.75                                |
| Interfaz                           | UART  |
| Velocidad de transmisión text[bps] | 9600  |
| Dimensiones [mm <sup>3</sup> ]     | 36 x 26 x 4   |

**Tabla 3.4** – Especificaciones módulo GPS GY-NEO6MV2

Entre los componentes que integra el módulos se puede diferenciar:

- Regulador de tensión LDO de 3.3 V, este sirve para alimentar a los distintos componentes del módulo.
- Memoria EEPROM 24AA32A, para guardar la configuración del receptor GPS cuando se quita de la alimentación el módulo.
- LED rojo, este LED funciona como indicador. De manera que empieza a parpadear cuando el receptor consigue recibir señales de los satélites, momento a partir del cual el módulo ya es servicial.
- Batería de 3 V, batería de respaldo para garantizar una correcta alimentación de los componentes.
- Receptor NEO-6Q/M, receptor GPS encargado de obtener la posición GPS del módulo y generar como salida la trama NMEA utilizada para tareas de localización y navegación.
- Antena cerámica, este módulo incorpora una antena cerámica cuyas especificaciones están listadas en la tabla XX

Para obtener el consumo global del módulo (tabla 3.5), hay que analizar los consumos individuales de los distintos componentes que lo forman. La hoja de datos del receptor NEO-6Q/M indica que el consumo típico de este componente es de 47 mA. Mientras que el consumo máximo que puede llegar a alcanzar es de 67 mA.

Para el caso de la memoria 24AA32A, en la hoja de características especifica que la corriente típica cuando está en funcionamiento es de 0.1 mA, con una corriente máxima de 3 mA.

Por último, para conocer la corriente del módulo, hace falta conocer la corriente con la que se recarga la batería de la figura 3.10b. Para ello, hay que tener en consideración la caída de tensión que hay en el diodo, la cual es totalmente desconocida. Suponiendo que la caída de tensión en él es de 0.2 V aproximadamente, y que la resistencia serie que tiene conectada es de 1 k $\Omega$  :

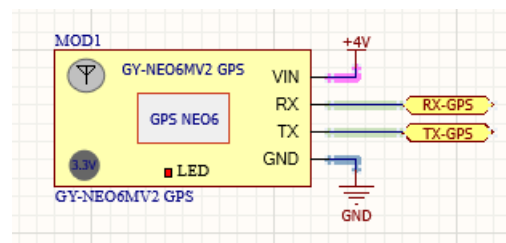
$$I = \frac{3,3V - 0,2V - 3V}{1k\Omega} = 100\mu A \quad (3.1.2)$$

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| NEO-6Q/M        | Típica: 47 mA<br>Máxima: 67 mA     |
| Memoria 24AA32A | 0.1 mA                             |
| Batería litio   | 100 $\mu$ A                        |
| Corriente total | Típica: 47.2 mA<br>Máxima: 67.2 mA |

**Tabla 3.5** – Corriente consumida por el módulo GPS GY-NEO6MV2

Como punto negativo este módulo tiene un tiempo de puesta en servicio grande. Durante las pruebas del desarrollo del prototipo que se han realizado, se ha cronometrado el tiempo que tarda el receptor GPS en encontrar las señales provenientes de los satélites y ofrecer las tramas como dato de salida. En tres mediciones que se han realizado, los tiempos de cada una de ellas son de 182 s, 247 s, 231 s. Teniendo una media de 220 s para que el módulo GPS empiece a ser funcional cada vez que se desconecta el dispositivo de la alimentación.

Esto de cara a un producto servicial es una demora de tiempo considerable que no podría permitirse. Por lo que quizás en etapas futuras de este proyecto es necesario cambiar el módulo GPS utilizado por otro de mejores prestaciones para conseguir que el tiempo de puesta en servicio se reduzca.



**Figura 3.11** – Esquemático del módulo GY-NEO6MV2

#### 3.1.2.4. Módulo de conexión inalámbrica

Para llevar a cabo el control del barco desde la distancia, es necesario un módulo de conexión inalámbrica. De esta manera, es posible controlar el barco remotamente mandando órdenes a un servidor, así como que el dispositivo del barco envíe datos en tiempo real sobre el estado de la tarea desempeñada.

Para poder abordar esta funcionalidad, es necesario utilizar un módulo GSM/GPRS. Ambos son servicios de comunicación inalámbrica, sin embargo, sus diferencias son claras y es necesario conocerlas para poder avanzar de una forma correcta en el desarrollo del dispositivo

GSM es un servicio dedicado a la comunicación inalámbrica mediante la conmutación de circuitos. Esto viene a decir que, en este tipo de comunicación se establece un canal fijo, el cual se mantiene activo durante toda la transmisión entre dos puntos de la red, como pueden ser dos teléfonos móviles. Este estándar se basa en la tecnología de telefonía móvil de segunda generación (2G), y se utiliza para llamadas telefónicas, mensajes de texto y otros datos básicos [36].

Por otro lado, el GPRS es un servicio evolucionado del GSM, el cual ofrece servicio móvil a Internet. Este opera mediante una conmutación de paquetes, de manera que permite la transmisión de datos en pequeños paquetes de forma discontinua sin tener que establecer un canal fijo que se tiene que mantener durante toda la transmisión. Por lo que gracias a esto, el GPRS es más eficaz a la hora de aprovechar el ancho de banda y permite que varios usuarios utilicen el mismo canal simultáneamente.

Entre las ventajas que introduce el GPRS podemos encontrar [37]:

- Velocidad de transmisión de datos y tiempos de acceso: Mientras que el GSM ofrece una velocidad de datos de 9.6 kbps y tiempos de acceso de varios segundos, el GPRS ofrece una velocidad de entre 14.2 y 115.2 kbps y tiempos de acceso por debajo de un segundo. Por lo que los tiempos de espera se reducen considerablemente.
  
- Variedad de servicios de datos: A diferencia del GSM, el GPRS soporta servicios de datos como pueden ser búsquedas en Internet, mandar correos electrónicos, o transferir contenidos multimedia.
  
- Facturación: En el caso de los servicios de conmutación de equipos como es el caso del GSM, la facturación se hace en base al tiempo de conexión del canal entre los dos circuitos. Esto para casos de aplicaciones de comunicaciones intermitentes no es adecuado ya que se factura todo el tiempo de conexión, incluso hasta cuando hay periodos inactivos. Sin embargo, en los servicios por paquetes, la facturación se hace en base al volumen de datos que se han transmitido. Sin importar en este caso el tiempo que haya durado la conexión.

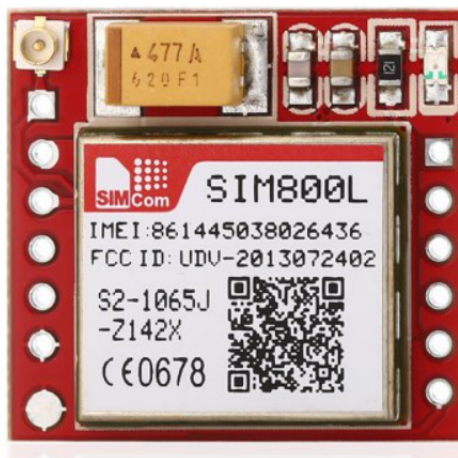
Entre los diversos usos que tiene el GPRS se pueden encontrar aplicaciones como el internet de las cosas (IoT), donde se obtiene información desde sensores o dispositivos remotos. Así como en sistemas de localización GPS como es este caso, donde los datos de la localización son enviados mediante GPRS a un servidor.

#### 3.1.2.5. Módulo SIM800L

Para satisfacer esta función, se ha utilizado un módulo GSM/GPRS SIM800L. Este modelo es una buena opción de cara a que tiene un precio bajo y dimensiones reducidas.

| Nombre                         | Módulo GSM/GPRS SIM800L<br><a href="#">Hoja de datos del IC</a> |
|--------------------------------|---|
| Tensión de alimentación [V]    | 3.4 a 4.4   |
| Corriente de consumo [A]       | Típica: 0.7 - 1<br>Pico: 2                                      |
| Interfaz                       | UART  |
| Velocidad de datos [kbps]      | Hasta 85.6  |
| Protocolo de comunicación      | Comandos AT   |
| Dimensiones [mm <sup>3</sup> ] | 25 x 25 x 6   |

**Tabla 3.6** – Especificaciones SIM800L



**Figura 3.12** – Módulo SIM800L utilizado

Además, es un módulo ampliamente conocido, por lo que hay una gran cantidad de información de como usarlo, sumado a que ya estaba disponible en el laboratorio. Por lo que nuevamente pensando en aprovechar al máximo los componentes de los que dispone el laboratorio se ha decantado por él. Las características más importantes están listadas en la tabla 3.6.

Uno de los inconvenientes de este módulo es que no es compatible con 4G. Por lo que puede quedarse obsoleto con el paso del tiempo ya que en algunos países están siendo eliminados el 2G y 3G. Además, este es poco flexible admitiendo solo una interfaz de comunicación UART.

En la hoja de características del módulo, el fabricante advierte que los pines de la comunicación serial no pueden estar conectados directamente a los GPIO del MCU, sino que se debe de utilizar unos desplazadores de nivel para que la comunicación serial sea la correcta. Sin embargo, la placa auxiliar que se ha utilizado para aprender a hacer uso de este módulo no incorpora ningún desplazador de nivel para esa función, por lo que se ha optado por no hacerlo tampoco en este diseño, ahorrando de esta manera en cantidad de componentes y reduciendo el coste.

Hay que tener en cuenta que dependiendo del modo de funcionamiento que tengan configurado, puede llegar a alcanzar picos de consumo de hasta 2 A. Por lo que es un punto a tener en cuenta tanto para la generación del

esquemático, así como el dimensionamiento de las trazas de la siguiente fase.

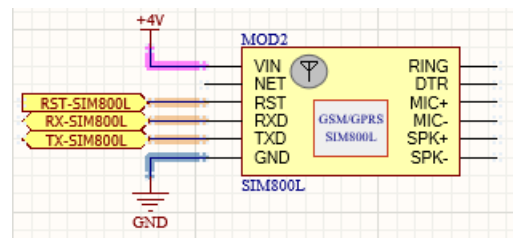


Figura 3.13 – Esquemático del módulo SIM800L

### 3.1.3. Módulo de Reloj en Tiempo Real (RTC)

Un RTC es un dispositivo electrónico, normalmente en forma de circuito integrado (IC) el cual se encarga de medir el paso del tiempo. La gran mayoría de los módulos están formados por este circuito integrado, sumado a un reloj externo el cual es un oscilador de cristal. Que son los que se utilizan normalmente en un reloj de cuarzo [38].

Aparte del circuito integrado y el oscilador de cristal, estos módulos vienen acompañados de una fuente de alimentación alternativa para cuando la fuente primaria se corta o no está disponible. Normalmente, esta fuente de alimentación alternativa suele ser una pila de litio, mientras que en módulos de mayores prestaciones se pueden ver casos en los que dicha fuente es un supercondensador. Ya que estos se pueden soldar y desoldar con facilidad, además de que son recargables.

Teniendo como MCU en este proyecto un ESP32, se podría abarcar este apartado con uno de sus relojes. Este MCU cuenta con módulos de reloj que son utilizados para proveer la señal de reloj que generan a distintas partes del microcontrolador. Como puede ser el procesador, algunos de sus periféricos, las interfaces de comunicación síncronas, o también pueden ser utilizados en periféricos externos.

Entre las fuentes de reloj del ESP32 encontramos dos osciladores RC internos; uno de 8 MHz, y el otro de 150 KHz. Además cuenta también con la posibilidad de conectar dos cristales externos a los pines del MCU que indica el fabricante, obteniendo así fuentes de reloj externas adicionales [39].

Sin embargo, el utilizar un módulo RTC externo tienen una serie de ventajas, y son:

- El propio fabricante del ESP32 advierte que las fuentes de reloj internas formadas por osciladores RC no son precisas, y que son más sensibles a cambios en el ambiente en comparación a las señales generadas por un cristal. Por lo que la medición del paso del tiempo que se podría realizar tendría un mayor porcentaje de error en comparación con la obtenida por un módulo RTC.
- Si se decide utilizar un reloj interno para llevar a cabo la medición del tiempo, se le está dando otra tarea más al MCU. En el caso de este proyecto, desde un inicio el MCU tiene una carga computacional alta, por lo que se va a intentar en medida de lo posible derivar tareas para que las hagan periféricos externos y no el propio MCU.
- El dispositivo nunca se va a poder quitar de la alimentación si se utiliza el reloj interno del MCU. Además este nunca podrá apagarse por completo, incluso hasta en los periodos donde no tenga actividad deberá permanecer en modo de hibernación, ya que en el caso de que el MCU pierda alimentación se descalibrará la hora.

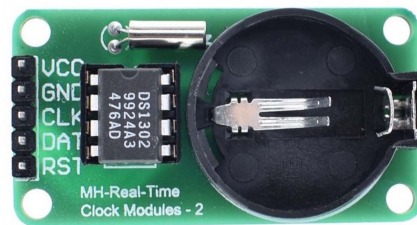
Para este proyecto se ha utilizado un módulo DS1302 disponible en el laboratorio. Este integra el IC DS1302, un cristal de cuarzo, y una batería de litio de 3 V como alimentación auxiliar para que la medición del tiempo continúe cuando no esté conectada la batería del barco.

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Nombre                         | Módulo RTC DS1302<br><a href="#">Hoja de datos del IC</a> |
| Tensión de alimentación [V]    | 2 a 5.5   |
| Corriente de consumo [A]       | Típica: 0.425<br>Máxima: 1.28                             |
| Interfaz                       | Serial de 3 hilos   |
| Precisión [ppm]                | $\pm 2$   |
| Batería                        | CR2032  |
| Dimensiones [mm <sup>3</sup> ] | 31 x 15 x 4   |

**Tabla 3.7** – Especificaciones módulo RTC DS1302

La frecuencia del cristal de cuarzo es de 32.768 KHz, o lo que es lo mismo,  $2^{15}$  ciclos por segundo. Sus características están resumidas en la tabla 3.7.

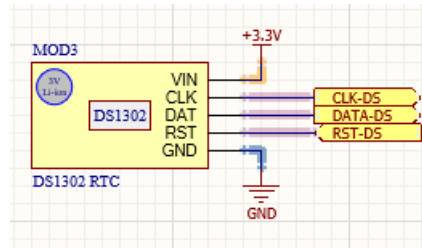
3



**Figura 3.14** – Módulo RTC DS1302 utilizado

Entre las funcionalidades que se pueden incorporar gracias a la utilización de este módulo encontramos:

- Poder encender la luminaria del barco de forma automática entre un rango de horas en las que se considere que la luz del Sol no es suficiente.
- Hacer un registro de cuanto tarda en desplazarse desde el punto de salida hasta las coordenadas deseadas. Pudiendo así hacer una estimación de cuando tiene que retornar al punto de inicio según la carga de la batería.
- Se pueden hacer mediciones que son interesantes para la experiencia de usuario. Como puede ser la duración del proceso de cargado de la batería, o el tiempo que ha necesitado el GPS para establecer conexión con los satélites.
- Medir parámetros como por ejemplo el tiempo que tarda el barco en hacer un giro de 90°. Estos parámetros son necesarios para extraer la planta del barco en un sistema de control realimentado.



**Figura 3.15** – Esquemático del módulo RTC DS1302

El inconveniente de este módulo es que ya está obsoleto, además de que tiene dimensiones grandes y utiliza una interfaz de comunicación serial de 3 hilos, lo cual hace que queden menos GPIO libres para otros fines comparado a si se utilizase otra interfaz como el I2C.

3

En la tabla 3.8 se presenta otra alternativa que podría utilizarse en versiones futuras.

| Nombre                         | Módulo RTC DS1307<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
|--------------------------------|--|
| Tensión de alimentación [V]    | 3 a 5.5  |
| Corriente de consumo [A]       | Máxima: 1.5  |
| Interfaz                       | I2C  |
| Precisión [ppm]                | $\pm 2$  |
| Batería                        | CR1220   |
| Dimensiones [mm <sup>3</sup> ] | 25 x 21 x 5  |

**Tabla 3.8** – Especificaciones módulo RTC DS1307

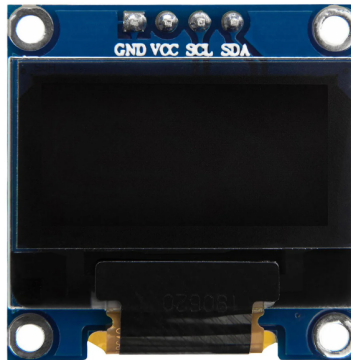
### 3.1.4. Módulo OLED SSD1306

Es necesario disponer de un panel o pantalla para tener de este modo un periférico externo que permita visualizar datos importantes. Como puede ser mostrar un menú para poder elegir a través de él la configuración, así como el modo de funcionamiento que se requiere que tenga el barco.

El módulo utilizado está basado en el IC SSD1306, el cual es un chip OLED/PLED para controlar sistemas de visualización gráfica de matriz de puntos con diodos LED. Este IC incorpora control de contraste, memoria RAM para la pantalla y un oscilador, de manera que se reduce así el número de componentes externos que se requieren.

El chip está pensado para control de paneles OLED de cátodo abierto de una resolución 128 x 64. Este soporta interfaz de comunicación I2C, SPI de 3 o 4 hilos, o interfaz serie paralela 6800/8080, la interfaz de comunicación que se decida que debe de utilizar es seleccionable mediante hardware.

El módulo del que se dispone en el laboratorio viene configurado por hardware para una interfaz I2C, cosa que es positiva ya que es una interfaz fácil y cómoda de utilizar [40]. Las características principales del módulo se muestran en la tabla 3.9.



**Figura 3.16** – Módulo OLED SS1306 utilizado

El uso de un panel OLED es un punto a favor ya que al no necesitar retroiluminación, el consumo disminuye considerablemente. Además, al poder controlar cada píxel de forma independiente, se pueden mostrar símbolos o gráficos que no sean alfanuméricos.

3

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Nombre                          | Módulo OLED SS1306<br><a href="#">Hoja de datos del IC</a> |
| Tipo                            | Panel OLED   |
| Tensión de alimentación [V]     | 1.8 a 6  |
| Corriente de consumo [ $\mu$ A] | Típica: 150  |
| Resolución                      | 128 x 64   |
| Interfaz                        | I2C, SPI(3 o 4 hilos)                                      |
| Dimensiones [ $\text{mm}^3$ ]   | 27 x 24 x 2  |

**Tabla 3.9** – Especificaciones módulo OLED SSD1306

### 3.1.5. Unidad de Medida Inercial (IMU)

Las IMU son unos dispositivos versátiles que ofrecen como salida datos del movimiento mediante una combinación de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Estas son utilizadas en un amplio ámbito de aplicaciones como la navegación, robótica o la industria del automóvil [41].

Para este proyecto, la IMU va a ser útil para conocer la orientación del barco a la hora de desarrollar el algoritmo de guiado automático. El módulo que se va a utilizar es el Adafruit 10-DOF, ya disponible previamente en el laboratorio. Esta IMU es una de las más completas que se pueden encontrar en el mercado para este tipo de proyectos. Ya que dispone de 3 sensores IC, que en conjunto ofrecen una gran variedad de datos sobre el movimiento y orientación del cuerpo. Además, todos los sensores admiten una interfaz de comunicación I2C, por lo que es fácil conectarse con ellos, y sus dimensiones son reducidas.

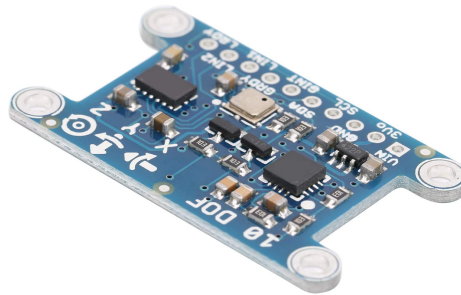
- Sensor de presión digital BMP180. Este sensor se basa en la tecnología piezoresistiva para hacerlo robusto frente a las interferencias electromagnéticas, una precisión y linealidad alta. Este puede medir un rango de presión de



entre 300 y 1100 hPa, lo que equivale a una latitud de entre -500 y 9000 m con respecto al nivel del mar.

- Giróscopo MEMS de 3 ejes L3GD20. Un giróscopo es un dispositivo que produce una salida de voltaje digital positiva para una rotación en sentido antihorario en el eje que se hace la medición. Este ofrece como salida de datos tres canales: yaw, pitch y roll.
- Compás digital LSM303DLHC. Este es un sistema que incorpora un sensor acelerómetro lineal 3D, y un sensor magnético 3D. Tiene escalas seleccionables por el usuario tanto del acelerómetro, como del sensor magnético.

Las características del módulo están listadas en la tabla 3.10.



**Figura 3.17** – Módulo Adafruit 10-DOF utilizado

| Nombre                      | Adafruit 10-DOF IMU Breakout [42]  |
|-----------------------------|--|
| Sensores integrados         | - Acelerómetro y giroscopio: <a href="#">LSM303DLHC</a> (3 ejes cada uno)<br>- Magnetómetro: <a href="#">L3GD20H</a> (3 ejes)<br>- Barómetro: <a href="#">BMP180</a> (presión barométrica y temperatura) |
| Voltaje de operación        | 3.3V a 5V  |
| Consumo de corriente        | Típicamente alrededor de 3.6 mA  |
| Interfaz de comunicación    | I2C  |
| Rango de aceleración        | $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$  |
| Rango de giroscopio         | $\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$   |
| Rango de magnetómetro       | $\pm 1.3$ to $\pm 8.1$ gauss   |
| Rango de presión            | 300 a 1100 hPa   |
| Resolución del acelerómetro | 16 bits  |
| Resolución del giroscopio   | 16 bits  |
| Resolución del magnetómetro | 12 bits  |
| Resolución del barómetro    | 0.03 hPa (precisión de altitud: 0.25 m)  |
| Rango de temperatura        | $-40^\circ\text{C}$ a $+85^\circ\text{C}$  |
| Dimensiones                 | 23 mm x 22 mm x 2 mm   |

**Tabla 3.10** – Especificaciones Adafruit 10-DOF

Este módulo se ha dejado de comercializar, por lo que en el caso de querer poner en funcionamiento más de un barco, sería necesario cambiarlo por otro módulo que también satisfaga las necesidades. Para este proyecto solo es

importante la información de la orientación del barco. Por lo que en vez de optar por utilizar otra IMU diferente, se podría utilizar un sensor magnético digital para suplir esta necesidad. Sin embargo, al utilizar una IMU se puede obtener más información de interés, como si el barco ha volcado o golpeado por una ola de grandes dimensiones.

### 3.1.6. Servomotor

Como se explicó en la sección 2.2, los servomotores se alimentan al voltaje nominal de la batería y no necesitan desplazadores de nivel para la señal de control, por lo que el diseño electrónico de estos es sencillo.

El servomotor que se utiliza para la apertura del compartimento trasero ha tenido que ser conectado a uno de los pines del ESP32 que se usan para la memoria flash SPI. Por lo que es recomendable desconectar el servomotor de la PCB cuando se cargue el programa al MCU para evitar que se pueda mover de forma aleatoria.

### 3.1.7. Monitorización de corriente y voltaje

La batería es una de las partes fundamentales del dispositivo, ya que requiere un mantenimiento y cuidado meticuloso para que su ciclo de vida sea lo más duradero posible. Evitando entre otras cosas que su capacidad de almacenamiento disminuya según va acumulando ciclos de carga y descarga.

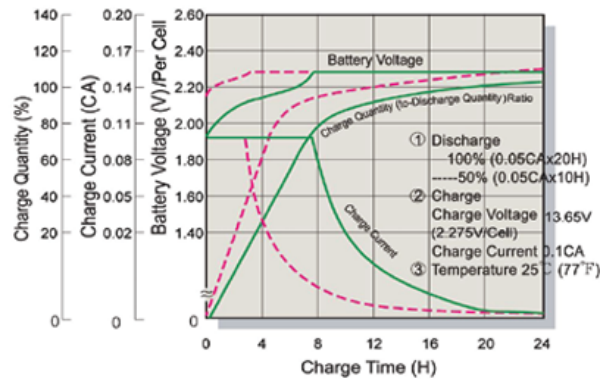
Para llevar a cabo el mantenimiento y cuidado de la batería, es necesario un Sistema de Gestión de Baterías (BMS). Este sistema se utiliza principalmente en baterías de dimensiones mayores, las cuales están formadas por varias celdas. Entre sus funciones principales encontramos:

- Control de la descarga. Vigila que la corriente de descarga no sea mayor a la que es capaz de soportar la batería. Además de que esta no se pueda descargar por debajo de los niveles que recomienda el fabricante, ya que esto podría provocar que se deterioren y pierdan almacenamiento. En el caso de las baterías de ácido-plomo, si se descargan por debajo de los niveles recomendados, se forman unos cristales de sulfato que provocan que la capacidad de almacenamiento de la batería disminuya perdiendo así capacidad.
- Control de la carga. El protocolo que se utiliza para el cargado de la batería es una de las partes fundamentales del ciclo de funcionamiento de esta. Como norma general, un protocolo de carga tiene tres fases diferenciadas. La primera de ellas es de cargado a corriente constante, fase en la cual se introduce una corriente constante en la batería, de manera que el voltaje entre los bornes de esta va aumentando según lo hace el porcentaje de carga.

Cuando el almacenamiento ronda el 80 % aproximadamente, aparece la segunda la fase, la cual consiste en un cargado a tensión constante. En esta fase se aplica un voltaje constante en bornes equivalente al voltaje de máxima carga de la batería. Durante esta fase, la corriente que se introduce ya no es fija, si no que depende de lo que solicite la batería, disminuyendo progresivamente hasta que la batería alcanza el 100 %.

Una vez está cargada al completo aparece la última fase, la cual consiste en mantener la batería con la capacidad al completo. En esta fase se aplica en bornes un voltaje un poco superior al nominal de la batería, evitando de esta manera que se descargue con el paso del tiempo por inactividad.

Este protocolo de carga es el más general y el que se utiliza en la mayoría de los casos para las baterías de ácido-plomo. Sin embargo, según la química de la batería este podría variar un poco. Por ejemplo, en las baterías de Níquel, al final del proceso cuando la batería está ya cargada al completo, las celdas de esta se empiezan a calentar. Por lo que monitorizando la temperatura de las celdas se puede saber cuándo la batería está cargada al completo.



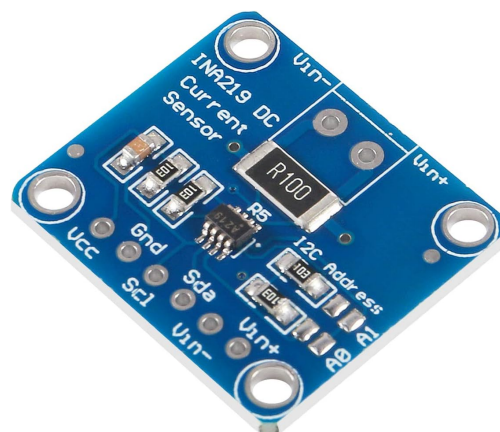
**Figura 3.18** – Curva de cargado de la batería MS7-6 utilizada

3

- Control de la temperatura de la batería. En ocasiones se originan fallas en las celdas de una batería, provocándose así reacciones exotérmicas peligrosas. Por lo que el sistema BMS debe detectar aumentos anómalos de la temperatura de las celdas y cortar el suministro de energía de inmediato.
- Toma de decisiones. Las baterías deben de ecualizarse de forma periódica para no perder capacidad de almacenamiento. Esto consiste en sobrecargar la batería, para que en el caso de las baterías de ácido-plomo por ejemplo, se disuelvan los cristales de sulfato que hayan podido crearse. Además, las celdas en serie suelen desbalancearse descargándose unas más que otras. Por lo que al no tener todas ellas el mismo porcentaje de carga, no se aprovecha el almacenamiento completo de la batería. Para ello el BMS debe de balancear las celdas, nivelándolas para que todas ellas tengan el mismo porcentaje de carga.

Dado que la batería de este proyecto no es tan compleja, se puede implementar una especie de BMS a menor escala. El cual satisfaga las necesidades de controlar el porcentaje de carga de la batería y monitorizar en tiempo real la corriente que se le demanda. De manera que se puede utilizar un IC de monitorización de corriente y voltaje, y a partir de ahí desarrollar el firmware para suplir las necesidades.

Para este proyecto se va a utilizar un módulo que integra el IC INA219. Este IC es un sensor shunt de corriente y potencia que puede medir valores de tensión de hasta 26 V, y voltajes shunt de hasta 320 mV. Las características principales del módulo aparecen en la tabla 3.11.



**Figura 3.19** – Módulo INA219 utilizado

















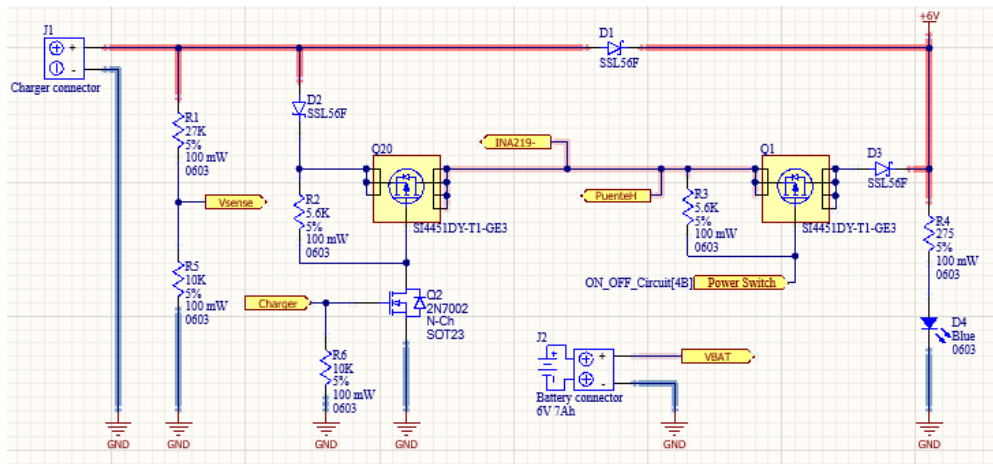


Figura 3.22 – Esquemático del circuito para el cargado de la batería

3

### 3.1.10. Control del motor DC

Otro de los aspectos a tratar es el control del motor DC que se utiliza para propulsar el barco. Este punto es vital para el guiado, ya que es necesario utilizar un sistema que permita variar la velocidad de propulsión según las necesidades. Así como poder mover el barco hacia adelante o en contradi dirección, para que en el caso de atascarse con algún objeto, poder rectificar y proseguir con la marcha. Para ello es común utilizar un puente H.

Un puente H es un circuito electrónico el cual utiliza señales PWM para controlar tanto la polaridad del voltaje aplicado, como la intensidad que circula por la carga. Estos son principalmente utilizados para controles de motores DC, y están basados en cuatro interruptores los cuales se controlan simultáneamente por pares. De manera que dependiendo que par de estos esté activado, el voltaje aplicado tendrá una polaridad u otra.

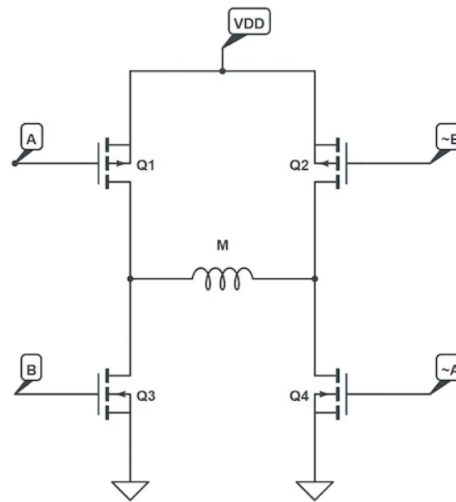
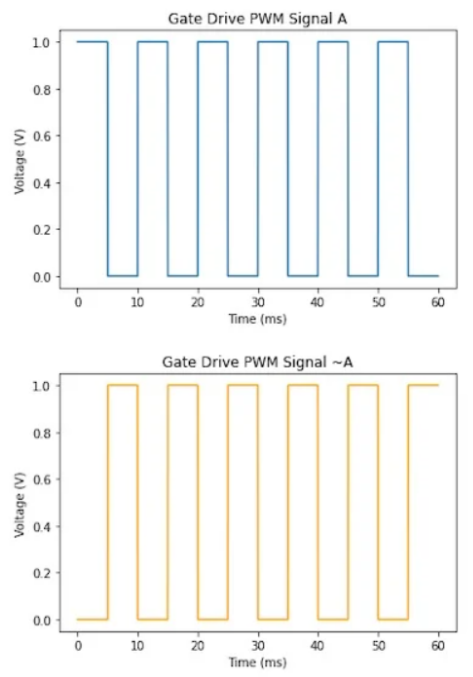


Figura 3.23 – Esquema de puente H [12]

En la práctica estos interruptores en realidad son transistores, pudiendo utilizar transistores de tecnología MOSFET o BJT. En la figura 3.23, se puede observar un ejemplo simplificado de un puente H de transistores MOSFET. En el que los transistores Q1 y Q4 forman un par, mientras que los transistores Q2 y Q3 son el otro par, cada cual se maneja con una señal de control independiente. De manera que si la señal de los transistores Q1 y Q4 tiene un valor alto, el motor se polariza girando en un sentido. Mientras que, si es la señal de los transistores Q2 y Q3 la que tiene un nivel lógico alto, el motor se polariza girando en el sentido opuesto. Además, si ambas señales de control están en nivel bajo, se le quita el suministro de energía al motor ya que ambos bornes de este están conectados a masa. Sin embargo, hay que tener especial cuidado para que nunca se dé la situación en la que las dos señales se encuentren en nivel alto, ya que en ese caso los dos pares de transistores se pondrían en conducción, provocando que ambas ramas del puente se cortocircuiten.

Hay que aclarar que tal y como se muestra en la figura 3.23, en los diseños más habituales de puente H, cada par está formado por un transistor PMOS situado en el lado alto del puente, y un transistor NMOS colocado en el lado bajo. De manera que si el par es controlado con una única señal de control, es necesario colocar un inversor lógico en la entrada de la señal para alguno de los transistores.

En el caso de no utilizar inversores, mientras que con una señal de nivel alto se pone en conducción el transistor NMOS, el PMOS se pone en corte, y viceversa con una señal de nivel bajo, haciendo que nunca pudiese llegar a circular corriente por el motor. Con la utilización del inversor en una de las entradas de los transistores del par, lo que se tiene a la entrada de las puertas de los transistores es la misma señal, pero desfasada  $180^\circ$  como se puede observar en la figura 3.24. Permitiendo que los transistores se activen y corten de manera simultánea abasteciendo de energía al motor.



**Figura 3.24** – Señal de control PWM desfasada  $180^\circ$  [12]

En los puentes H es típico utilizar transistores PMOS en los lados altos, o transistores PNP en el caso de utilizar tecnología BJT. Ya que la teoría dice que un transistor NMOS se polariza cuando la tensión de puerta es mayor que la tensión de fuente. Esto es fácil de cumplir para los transistores de lado bajo, porque pueden utilizar voltajes de puerta referenciados a masa al estar su fuente conectada a masa. Sin embargo, los transistores de lado alto tienen la fuente conectada a los bornes del motor, cuyo voltaje es diferente respecto a masa. Por lo que el voltaje de puerta de estos transistores ya no está referenciado con respecto a masa, sino a un voltaje mayor. Haciendo necesario el uso de

tensiones superiores a la de alimentación del puente para las señales de puerta de transistores de lado alto.

Una de las formas de solucionar esto es colocando los ya mencionados transistores PMOS en los lados altos del puente. De esta manera cuando la señal de puerta se conecta a masa, se cumplirá la condición de conducción, y el transistor permitirá el paso de corriente tal y como se desea. Lo único que se debe tener en cuenta es que para que entren en corte, es necesario que  $V_{SG} > V_{SG(th)}$ . Por lo que hay que considerar esto a la hora de la selección de componentes para no cometer el error de utilizar un transistor PMOS con una tensión umbral tan alta que la señal de control del MCU utilizado no sea capaz de poner el transistor en corte.

En cuanto al puente H a utilizar en el proyecto, se tiene la opción de usar un puente H de componentes discretos, basado por ejemplo en el ilustrado en la figura 3.23, o bien utilizar IC basado en un puente H:

- Puente H basado en IC. Como puntos a favor, este tipo de puente H está integrado en un solo IC, lo que ayuda a la hora de realizar el proceso de ubicación de componentes y reducir el espacio ocupado. Además, estos incorporan toda la lógica necesaria para generar la señal modulada por ancho de pulso (PWM) que controla el paso de corriente por el motor, quitando carga computacional al MCU. Sin embargo, presentan el inconveniente de que es difícil encontrar un puente H que sea capaz de soportar la corriente que consume el motor DC utilizado en el barco, sumado a que son susceptibles a estropearse si no se utilizan de una forma correcta.
- Puente H de componentes discretos. Tiene el inconveniente de que está formado por un número elevado de componentes, lo que requiere más espacio al colocarlos en la placa, además de que el MCU se encarga del control del puente y la generación de las señales PWM. Por el contrario, al utilizar componentes discretos, las corrientes de fallo de estos son mayores que las que tiene un IC. Por lo tanto, si la selección de componentes se ha hecho de forma correcta, ante un pequeño fallo de control no se estropeará el puente H.

En el caso de este proyecto, se ha decidido utilizar un puente H de componentes discretos. Ya que durante la etapa de aprendizaje de desarrollo de firmware, se pueden cometer errores que pueden desembocar en cortocircuitos indeseados. De esta manera se garantiza un producto robusto a fallos, además de que se utilizan los componentes ya disponibles previamente en el laboratorio.

El puente H implementado de la figura 3.32 no utiliza transistores PMOS en el lado alto, si no que utiliza transistores NMOS IRL3803. Además se puede observar para el conjunto de transistores en los que la corriente circula en sentido 'M+' a 'M-', hay dos transistores en paralelo en cada lado del puente. Este conjunto de transistores corresponden a cuando el motor está polarizado para que el barco se desplace hacia delante, que es como va a estar polarizado en la mayoría de las ocasiones. Por lo que colocando dos transistores en paralelo, se consigue que la corriente que circula por cada uno de los ellos sea la mitad, evitando para periodos largos de actividad que se puedan calentar en exceso los transistores.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Nombre                     | IRL3803STRLPBF<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Tipo                       | NMOS  |
| $V_{GSth}$<br>[V]          | 1   |
| $I_{Dmax}$<br>[A]          | 140   |
| $R_{DSon}$<br>[ $\Omega$ ] | 0.009   |
| $C_G$<br>[nC]              | 140   |
| Encapsulado                | TO-262  |

**Tabla 3.17** – Especificaciones NMOS IRL3803

Como la señal de puerta de los transistores de lado alto necesita un valor superior al de la alimentación del puente, se va a incorporar un circuito ‘bootstrap’. El cual eleva el nivel de estas tensiones de puerta lo necesario para que los transistores puedan entrar en la zona de conducción. Para ello también se pueden utilizar drivers, que son circuitos integrados que controlan las señales de puerta los transistores, y son capaces de elevar la tensión para los transistores de lado alto. Estos drivers suelen controlar solo una rama, por lo que haría falta dos de ellos para controlar ambas partes del puente. En la tabla 3.18 viene reflejado un ejemplo de estos drivers que podría ser utilizado en versiones futuras.

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Nombre                         | DGD0506A<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Tipo                           | Driver de medio puente                    |
| $V_{\text{supply}}$<br>[V]     | -0.3 a +60                                |
| $V_{\text{hlevel}}$<br>[V]     | $V_S - 0.3$ a $V_B + 0.3$                 |
| Temperatura de operación<br>°C | -40 a +125                                |
| Encapsulado                    | MSOP-10                                   |

**Tabla 3.18** – Especificaciones driver DGD0506A

Un circuito ‘bootstrap’ se basa en el funcionamiento de un circuito de bombeo de carga, el cual consiste en una topología de circuito que se utiliza para aumentar el voltaje proporcionado por la fuente de alimentación. Este proceso se lleva a cabo almacenando la energía en un condensador, para después liberarla hacia otra parte del circuito usando componentes pasivos que ayudan a que la energía se redirija hacia el punto deseado, así como elementos activos que funcionan como conmutadores que determinan la carga y descarga del condensador.

El funcionamiento del puente H de la figura 3.32 es el siguiente: en un primer lugar, el pin ‘PWMF’ permanece en lado alto dando una tensión de +3.3 V que polariza al transistor Q8. Durante esta fase, los transistores Q6, Q7, Q10 y Q12 están en corte ya que sus puertas están conectadas a masa. Sin embargo, mientras que el pin ‘PWMF’ está en lado alto, el ‘PWMB’ está en lado bajo, por lo que el transistor Q5 y más concretamente Q11 está puesto en conducción, de manera que este último permite que pase corriente a través del diodo D6, cargando el condensador a un poco menos de la tensión de alimentación.

En la siguiente fase, el pin ‘PWMF’ es puesto a nivel bajo cortando el transistor Q8. Por lo que en este punto el condensador C4 queda conectado entre la puerta y fuente de los transistores Q7 y Q6. De manera que en la fuente de estos transistores hay un valor de tensión igual que el de la batería, mientras que en las puertas de estos transistores hay un valor de tensión aproximado de 11V gracias a la descarga de energía que ofrece C4 (funcionamiento ilustrado en figura 3.25). Permitiendo que estos entren en conducción así como también lo hacen los transistores Q10 y Q12, produciéndose un paso de corriente por la carga del puente H desde ‘M+’ a ‘M-’.

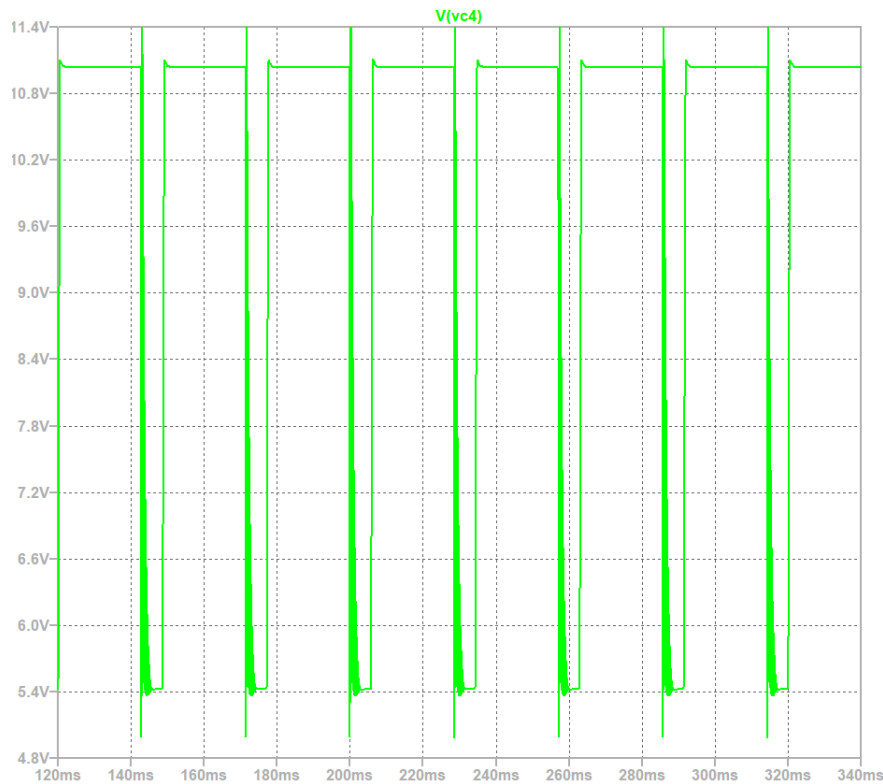


Figura 3.25 – Voltaje en el condensador bootstrap C4

Tras esta fase se vuelve al punto de inicio donde el pin ‘PWF’ está en lado alto y el ‘PWB’ en lado bajo, repitiendo de nuevo el ciclo. Esta explicación también es aplicable para cuando la señal PWM se genera en la otra rama del puente.

Para que el motor se desconecte de la alimentación es necesario poner los dos pines en valor alto, de manera que los bornes del motor están conectados ambos a masa. Sin embargo, si se dejan los dos pines en valor bajo, se produce un cortocircuito al conectar ambas ramas del puente H de manera simultánea.

Esta situación de cortocircuito es muy peligrosa, ya que circula una gran corriente por los transistores del puente H que puede provocar que se deterioren. En situación de cortocircuito con la batería como fuente de alimentación, la corriente de fallo viene determinada dependiendo de la resistencia serie de la batería sumado a la resistencia RDS de los dos transistores que forman uno de los semilados del puente H.

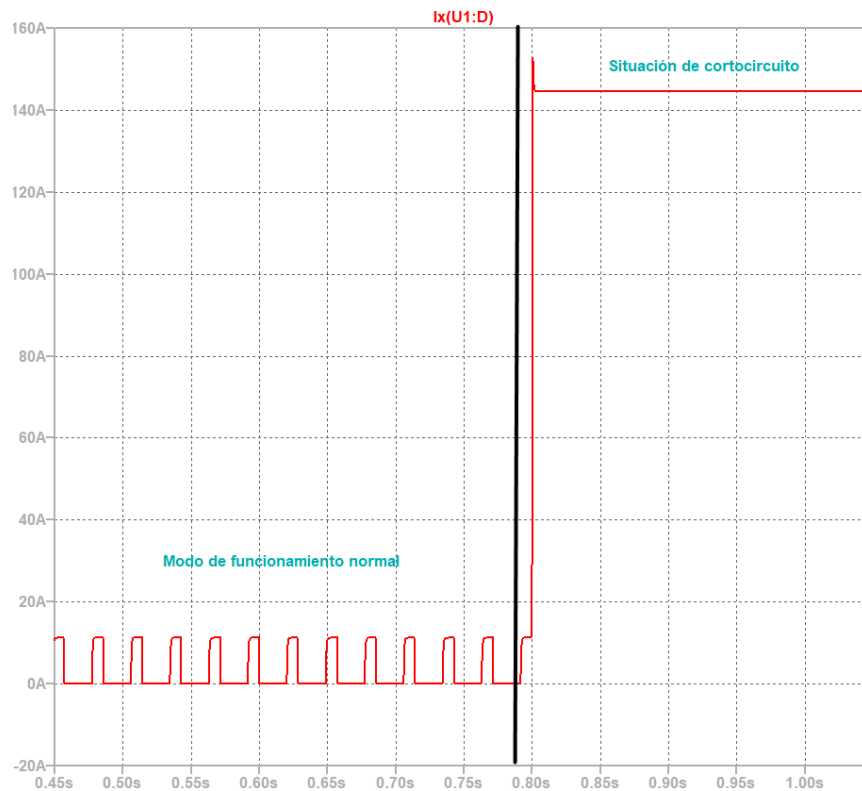
La resistencia de la batería **recién cargada** (esta va aumentando conforme la carga disminuye), es de  $20\text{ m}\Omega$ , y la  $R_{DSon}$  de los transistores es de  $9\text{ m}\Omega$ . Por lo que:

$$R_{cc} = 20\text{ m}\Omega + 2 \cdot 9\text{ m}\Omega = 38\text{ m}\Omega \quad (3.1.14)$$

De manera que se tendría una corriente de cortocircuito de:

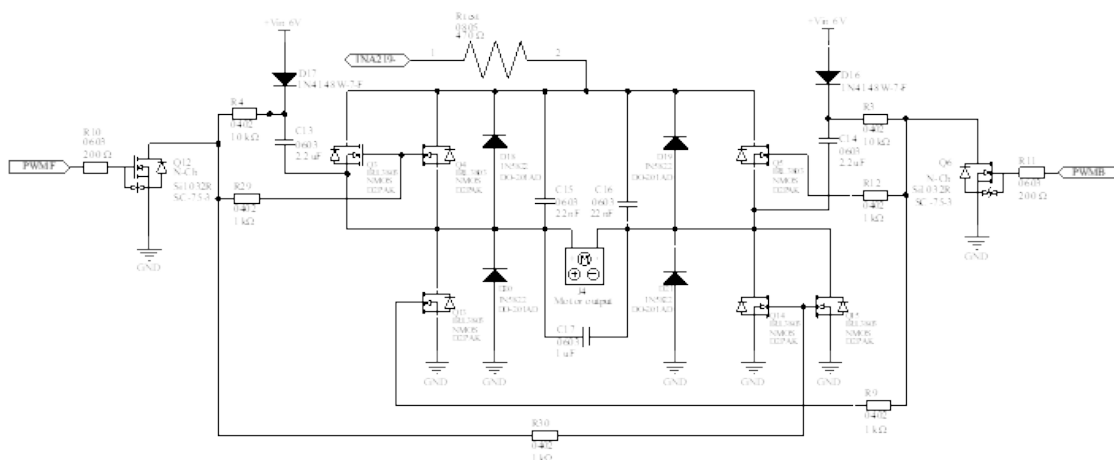
$$I_{cc} = \frac{V_{BAT}}{R_{cc}} = \frac{6\text{ V}}{38\text{ m}\Omega} = 157,9\text{ A} \quad (3.1.15)$$

Sería una corriente fatal para el circuito, esta situación se ha simulado también en LTSpice (figura 3.26).



**Figura 3.26** – Corriente que circula por un transistor en situación de cortocircuito en el puente H

El circuito utilizado es una versión actualizada del diseñado el año pasado (figura 3.27), ya que este tenía un problema. Al estar conectado el motor directamente a la batería, se alimenta instantáneamente conforme se conecta la batería a la placa. De manera que cada vez que se ofrece la alimentación, el tiempo de arranque del ESP32 no permite que se puedan controlar sus ramas a tiempo, produciéndose un cortocircuito ya que se ponen en conducción ambas ramas del puente.

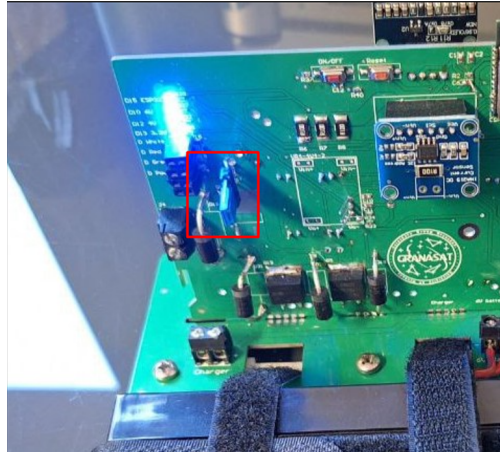


**Figura 3.27** – Puente H del prototipo anterior



El que se pusiesen en conducción ambas ramas al conectarlo a la alimentación es debido a la existencia de cargas estáticas que forman capacidades parásitas entre la puerta y la fuente de los transistores. De manera que cuando se alimentaba el circuito, estas cargas hacían que entrasen en conducción los transistores de un mismo semilado cortocircuitando el puente.

En las primeras pruebas de prototipado con la versión del año anterior, se resolvió el problema colocando un jumper en la entrada del puente H. De esta manera, una vez que el ESP32 se inicializaba y se tenía control sobre las puertas de los transistores, se conectaba el jumper permitiendo el paso de corriente al puente H.



**Figura 3.28** – *Recuadrado en rojo el jumper colocado*

Sin embargo, tras analizar el puente H con detenimiento se consideró que el problema podría ser originado por las capacidades parásitas y la ausencia de resistencias de pull-down en el puente. Estas resistencias son necesarias para evitar estas cargas parásitas provoquen que los transistores entren en conducción de forma indeseada. Por lo tanto se modificó el prototipo añadiendo estas resistencias, desapareciendo el fallo de cortocircuito al conectar la placa a la batería. Esto demuestra la gran importancia de las resistencias de pull-down y pull-up en el diseño electrónico.

Otro error que se solucionó con la colocación de las resistencias de pull-down, es el cortocircuito que se crea cuando hay un reset. A la hora de hacer un reset al ESP32, mientras que se deja accionado el pulsador, ambas señales del puente H se ponían en nivel alto, provocando por razones no muy conocidas del todo un cortocircuito en las ramas del puente. Sin embargo al colocar estas resistencias de pull-down, el puente H no se cortocircuita durante un reset. En la figura 3.29 se puede observar una medición con el osciloscopio de como ambas señales de control en las puertas de Q8 y Q9, se ponían en lado alto al pulsar el botón de reset. Volviendo a funcionar según lo previsto cuando el pulsador deja de ser accionado.



**Figura 3.29** – Señales de control en las puertas de los transistores Q8 y Q9

En cuanto a la función de los distintos componentes pasivos del puente H, las resistencias R15 y R16 evitan que se produzca un cortocircuito cuando los pines de control se ponen en lado alto, logrando que la corriente que circula por ellos cuando entran en conducción sea reducida.

Los transistores Q8 y Q9 tienen una corriente de drenador máxima de 200 mA, por lo que si se ajusta el valor de la resistencia para que por ellos circule 0.5 mA:

$$R = \frac{V_{BAT} - V_F}{I_{Dmax}} = \frac{6V - 1V}{0,5mA} = 10k\Omega \quad (3.1.16)$$

Por otro lado los condensadores C4 y C5 deben de dimensionarse de modo que tengan capacidad suficiente de energía como para poner en conducción los transistores de lado alto de puente H sin perder más del 10 % de almacenamiento. Por lo que se debe que cumplir que:

$$C_{boot} \gg C_g \quad (3.1.17)$$

Estos condensadores deben ser al menos 10 veces mayor a la capacidad presente en la puerta de los MOSFET, pudiendo calcular su valor mediante la siguiente expresión [44]:

$$C_g = \frac{Q_g}{V_Q} \quad (3.1.18)$$

Donde  $Q_g$  es la carga de puerta del MOSFET, y  $V_Q = V_{BAT} - V_F$

$$\text{Si } C_{boot} = 80 \cdot C_g; C_{boot} = \frac{80 \cdot Q_g}{V_Q} \quad (3.1.19)$$

Mirando la hoja de datos del transistor IRL13803 (tabla 3.17),  $Q_g = 140nC$ :

$$C_{boot} = \frac{80 \cdot 140 \text{ nC}}{5} = 2,24 \mu F \quad (3.1.20)$$

Además, debido al comportamiento inductivo del motor, se deben de colocar unos elementos de protección, que son los condensadores que hay conectados a la carga y los diodos de protección que se pueden observar en la figura 3.32.

En cuanto a los condensadores de protección, estos son utilizados para el arranque. Ya que en el transitorio para el cual se le aplica tensión al motor partiendo desde parado, aparece una corriente muy grande, la cual va disminuyendo conforme la velocidad de giro del motor va aumentando.

Esto es debido a la FEM que aparece en el motor tal y como se explicó en la sección 2.1.2. Conforme empieza a girar el motor, aparece en el una FEM inducida que es proporcional a la velocidad de giro y tiene signo contrario a la corriente que cruza desde la fuente de alimentación al motor. De manera que se opone a esta provocando que la corriente de consumo del motor vaya disminuyendo según alcanza mayor velocidad. Este transitorio inicial de corriente puede ser demasiado grande, hasta llegar el punto de poder dañar el motor. Para ello se colocan condensadores para que estos almacenen el exceso de corriente que se produce en esta fase.

Por otro lado, cuando se corta la alimentación al motor, aparece otro transitorio, ya que hay una FEM almacenada en el motor. Por lo que es necesario ofrecer un camino para que esta energía pueda ser liberada hacia algún sitio. Añadiendo diodos conectados en dirección contraria a los transistores, se ofrece un camino de baja impedancia para la liberación de esta energía. Ya que si no cabría la posibilidad de que estos transitorios que se producen en el apagado puedan generar picos de tensión que dañen los transistores. En este transitorio, el motor pasa a trabajar como un generador, convirtiendo la energía mecánica en eléctrica, pudiendo llegar a aprovechar la batería esa energía para cargarse [45].

El modelo de los diodo utilizado para esta función es el 1N5822, especificaciones en la tabla 3.19.

|               |   |
|---------------|---|
| Nombre        | 1N5822<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Tipo          | Diodo Schottky                          |
| $V_F$<br>[V]  | 0.475                                   |
| $I_F$<br>[A]  | 3                                       |
| $T_j$<br>[°C] | 150                                     |
| Encapsulado   | DO-201AD                                |

**Tabla 3.19** – Especificaciones diodo 1N5822

En cuanto a los MOSFET de control utilizados en el puente H, tienen que tener como características fundamentales una velocidad de conmutación rápida, y un voltaje umbral el cual pueda ser superado por los +3.3 V que ofrece el ESP32 como salida (tabla 3.20).

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Nombre                        | Si1032R<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Tipo                          | NMOS                                     |
| $V_{GSth}$<br>[V]             | 0.7                                      |
| $I_{Dmax}$<br>[mA]            | 200                                      |
| $R_{DSon}$<br>[ $\Omega$ ]    | 10                                       |
| Tiempo de conmutación<br>[ns] | 35                                       |
| Encapsulado                   | SC-75-3                                  |

**Tabla 3.20** – Especificaciones NMOS Si1032R

Al igual que con los transistores de control, los diodos utilizados en la parte alta del bootstrap deben de tener una velocidad de conmutación alta. Para esta ocasión se ha escogido el modelo 1N4148W-7-F.

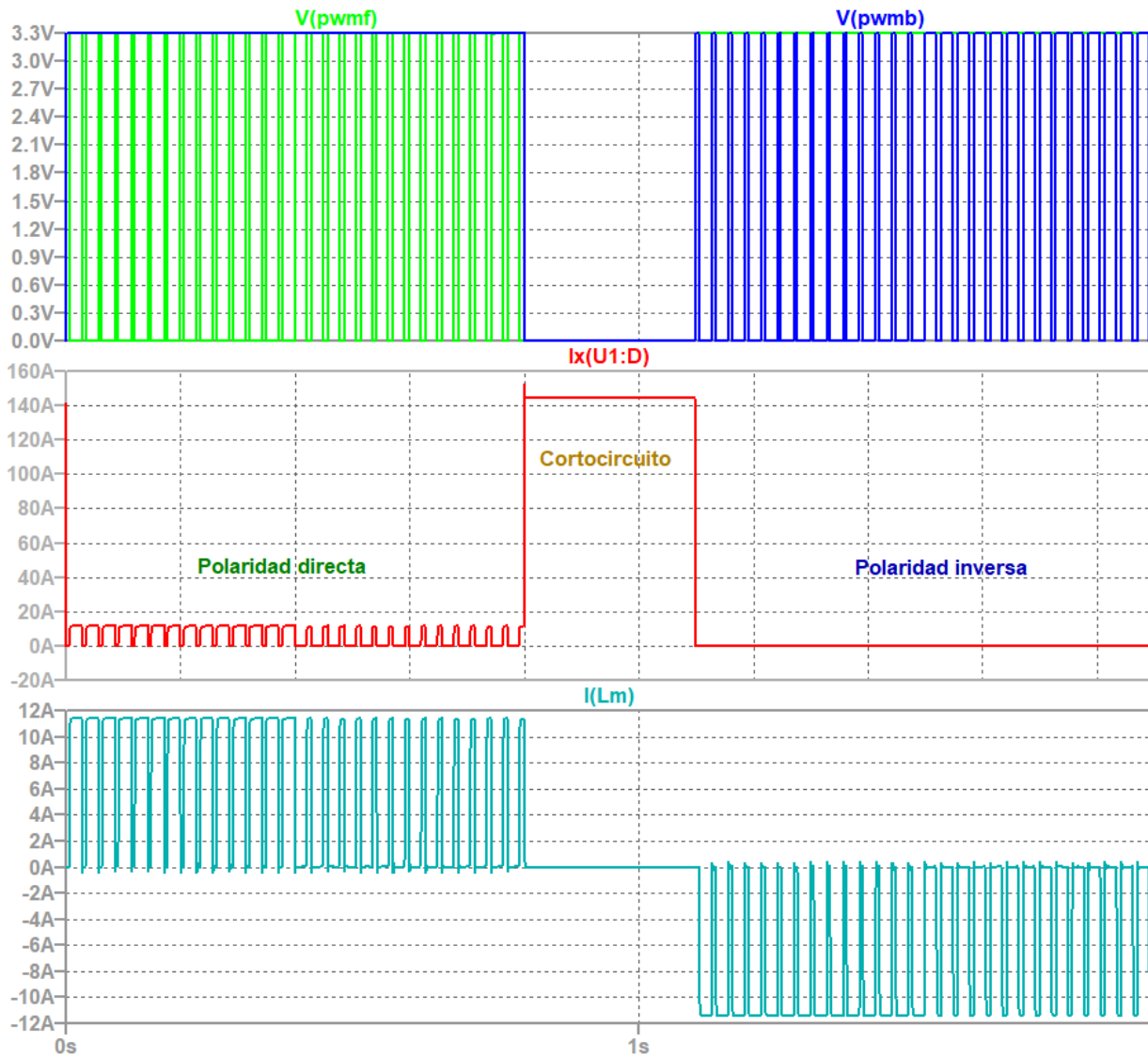
3

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Nombre                        | 1N4148W-7-F<br><a href="#">Hoja de datos</a> |
| Tipo                          | Diodo de conmutación rápida                  |
| $V_F$<br>[V]                  | 1  |
| $I_{Fmax}$<br>[mA]            | 300  |
| Tiempo de conmutación<br>[ns] | 4  |
| Encapsulado                   | SOD-123                                      |

**Tabla 3.21** – Especificaciones diodo 1N4148W-7-F

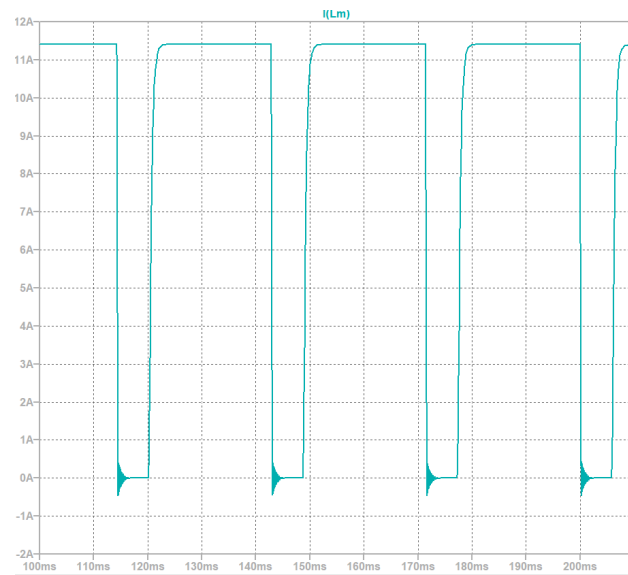
Como ventajas al utilizar este puente H es que se puede controlar la corriente media, y por consecuencia la velocidad a la que gira el el motor según las necesidades. Sin embargo presenta el inconveniente de que al utilizar un circuito bootstrap, no se puede utilizar el 100% del ciclo de trabajo para que el motor desempeñe la máxima potencia. Ya que en ese caso el condensador bootstrap se descargaría y los transistores pasarían a estar en corte.

En la figura 3.30 se muestra una simulación con LTSpice de un funcionamiento típico del puente H, donde hay una situación de polaridad directa, situación de fallo y situación de polaridad inversa respectivamente. Visualizándose en la primera gráfica las señales de control del puente, en la segunda la corriente que circula por uno de los transistores, y en la última se puede observar la corriente que circula por el motor.

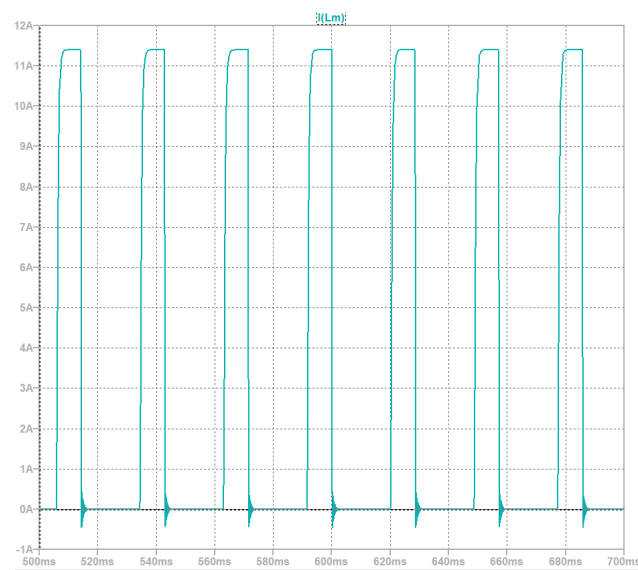


**Figura 3.30** – Distintas situaciones de funcionamiento en el puente H

Mientras que en la figura 3.31 se puede observar como la corriente media que circula por el motor varía dependiendo del ciclo de trabajo de la PWM de control.



(a) Corriente por el motor con ciclo de trabajo del 80 %



(b) Corriente por el motor con ciclo de trabajo del 20 %

Figura 3.31 – Corriente media del motor DC en función del ciclo de trabajo

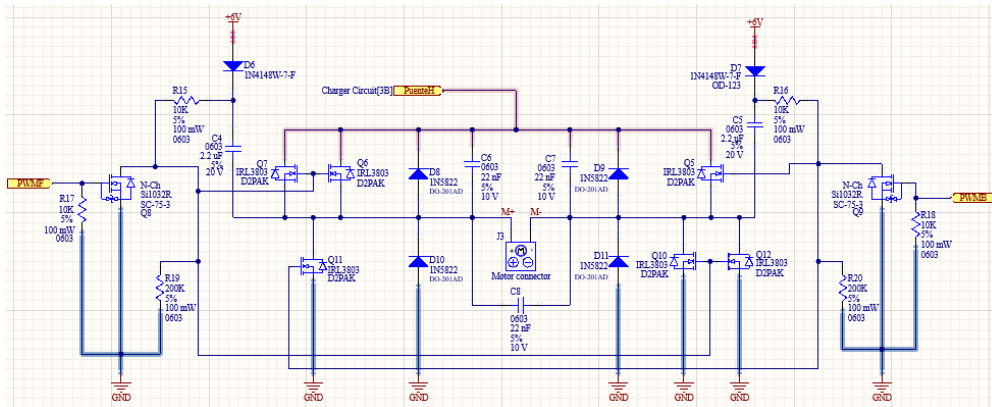


Figura 3.32 – Esquemático del puente H utilizado para el control del motor DC

3

3.1.11. Iluminación

Tal y como se explico en el capítulo 2, es importante presentar un dispositivo el cual sea lo más servicial posible. Para ello es necesario que el barco incorpore un sistema de luces con el que se puedan realizar indicaciones y que el barco sea visible en situaciones de poca luz.

3.1.11.1. LED SMD

A la salida de cada regulador de tensión, así como en el puerto de conexión de la batería, el cargador y el conector USB. Se han colocado LED SMD para comprobar que efectivamente hay suministro de energía a las distintas zonas de la placa.

Para los conectores externos como son el puerto de la batería, el cargador y el usb-c se han utilizado LEDs SMD de color verde. Mientras que para las salidas de los reguladores de tensión, como el pin de salida 'I/O' se han utilizado LED de color azul.

Según el color, estos LED tienen distinta tensión de polarización para una corriente directa dada. La hoja de datos indica la caída de tensión con la corriente necesaria para la máxima luminosidad. Sin embargo el que tengan tanta luminosidad puede ser molesto para la vista cuando se realizan tareas de depuración del prototipo. Por lo que hay que fijarse en la hoja de características de los LED cual es la tensión de polarización para la cual circula por ellos una corriente directa de 10 mA (figura 3.33).



































































